T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

3 BOYUTLU YAZICILARDA KULLANILAN POLİ(LAKTİK ASİT) VE KOMPOZİT FİLAMENTLERİNİN MEKANİK VE BASKI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

GÖKÇEN ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÖZYILDIRIM

EDİRNE-2021

GÖKÇEN ŞAHİN'in hazırladığı "**3 BOYUTLU YAZICILARDA KULLANILAN POLİ(LAKTİK ASİT) VE KOMPOZİT FİLAMENTLERİNİN MEKANİK VE BASKI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad): İmza

Doç. Dr. Aydan DAĞ

Dr. Öğr. Üyesi Didem TUNCAY

Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÖZYILDIRIM

Tez Savunma Tarihi: 20/12/2021

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÖZYILDIRIM

Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

20/12/2021

Gökçen ŞAHİN

Yüksek Lisans Tezi

3 Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Poli(Laktik Asit) ve Kompozit Filamentlerinin Mekanik ve Baskı Özelliklerinin Araştırılması

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada, 3 boyutlu (3B) yazıcılarda kullanımı gün geçtikçe artan poli(laktik asit) (PLA) ve kompozit filamentlerinin mekanik ve baskı özelliklerini etkileyen bazı çevresel şartlar incelenmiştir. Filament olarak PLA, PLA/Grafit ve PLA/polihidroksibütirat (PHB) kompozit filamentler kullanılmıştır. Çevresel şartlar olarak 25 °C sıcaklıktaki su ve %80 bağıl nemli ortam seçilmiştir. Filamentler 5, 10, 15, 20 gün süreler ile bu ortamlara maruz bırakılmış, daha sonra bu filamentlerden standart kemik numuneler basılmıştır. Filamentler ve basılan numunelere çekme testi uygulanmış, fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi (FTIR) analizleri yapılmış, numune yüzeylerinin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çevresel şartlara maruz kalmış PLA, PLA/Grafit kompozit filamentlerden yapılan 3B baskılarda baskı kalitelerinin ve çekme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Nemli ortama maruz kalan PLA/PHB kompozit filamentte ise baskı kalitesi ve çekme dayanımının arttığı görülmüştür.

Yıl : 2021

Sayfa Sayısı : 140

Anahtar Kelimeler : Polilaktik Asit, PLA filament, kompozit filamentler, 3 boyutlu yazıcı, filamentlerin mekanik özellikleri

Master's Thesis

Investigation of Mechanical and Printing Properties of Poly(Lactic Acid) and Composite Filaments Used in 3D Printers

Trakya University Institute of Natural Sciences

Department of Applied Sciences and Technology

ABSTRACT

In this study, some environmental conditions affecting the mechanical and printing properties of poly(lactic acid) (PLA) and composite filaments, which are increasingly used in 3 dimensional (3D) printers, were investigated. PLA, PLA/Graphite and PLA/polyhydroxybutyrate (PHB) composite filaments were used. Water at 25 °C and 80% relative humidity were chosen as environmental conditions. The filaments were exposed to these environments for 5, 10, 15, 20 days and then standard dog-bone samples were printed from these filaments. Tensile test was applied to filaments and printed samples, fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analyzes were made, surface roughness of sample surfaces were measured and scanning electron microscopes (SEM) images of fracture surfaces were taken. As a result of the experiments, it was observed that the print quality and tensile strength of 3D prints made from PLA, PLA/Graphite composite filaments that were exposed to environmental conditions decreased. It was observed that the print quality and tensile strength increased in PLA/PHB composite filament exposed to humid environment.

Year : 2021

Number of Pages : 140

Keywords : Polylactic Acid, PLA filament, composite filaments, 3D printer, mechanical properties of filaments

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında ve yüksek lisans eğitimim süresince bana yol gösteren, bilgi birikimi ve tecrübelerini paylaşarak her zaman yanımda olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÖZYILDIRIM'a,

Bu süreçte desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve sabırla her daim yanımda olan biricik hayat arkadaşım Anıl ŞAHİN'e,

Varlıkları ve ihtiyaç duyduğum her an yanımda olmaları ile bana güç veren, bugünlere gelmemi sağlayan güzel aileme,

Ve iyi dilekleri ile destek olan tüm dostlarıma,

Gönülden teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu yüksek lisans tezi TÜBAP tarafından 2019/284 proje numarası ile desteklenmiştir.

Gökçen ŞAHİN

Aralık 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

SİMGELER DİZİNİ x

KISALTMALAR DİZİNİ xi

ÇİZELGELER DİZİNİ xiii

ŞEKİLLER DİZİNİ xiv

BÖLÜM 1 1

GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 3

KAYNAK ARAŞTIRMASI 3

2.1. Poli(Laktik Asit) (PLA) 3

2.2. Kompozit Malzemeler 5

2.2.1. PLA Kompozitler 7

2.2.1.1. PLA/Grafit Kompozitler 8

2.2.1.2. PLA/PHB Kompozitler 9

2.3. 3B Yazıcılarda Kullanılan Filamentler 13

2.3.1. PLA 13

2.3.2. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) 15

2.4. 3 Boyutlu Yazıcılar 17

2.4.1. 3B Yazıcılarda Kullanılan Baskı Teknolojileri 21
2.4.1.1. Eriyik Yığma Yöntemi (FDM) 21
2.4.2. 3B Yazıcı Genel Parçaları 26
2.4.3. 3B Yazıcıların Kullanım Alanları 29
2.4.4. 3B Yazıcıların Avantajları 32
2.4.5. 3B Yazıcıların Dezavantajları 33
BÖLÜM 3 35
LİTERATÜR ÖZETİ 35
BÖLÜM 4 43
MATERYAL ve METOT 43
4.1. Kullanılan Malzemeler 43
4.1.1. Deneylerde Kullanılan Filamentler 43
4.2. Kullanılan Cihazlar 45
4.3. Deneysel Kısım ve Yöntemler 48
4.3.1. Numunelerin Üretilmesi 48
4.3.2. Numunelerin Şartlandırılması 51
4.3.3. Numunelerle Yapılan Analiz ve Deneyler 52
BÖLÜM 5 53
SONUÇLAR ve TARTIŞMA 53
5.1. 25 °C Sıcaklıktaki Su İçerisinde Şartlandırılan PLA Numunelerin Mekanik ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Değerlendirilmesi 53
5.1.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 54
5.1.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 69
5.1.3. Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi 71
5.2. 25 °C Sıcaklık ve %80 Bağıl Nemli Ortam İçerisinde Şartlandırılan PLA Numunelerin Mekanik ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Değerlendirilmesi ... 72

5.2.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 73
5.2.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... 88
5.2.3. Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi 90
5.3. 25 °C Sıcaklık ve %80 Bağıl Nemli Ortam İçerisinde Şartlandırılan PLA/Grafit ve PLA/PHB Kompozit Numunelerin Mekanik ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Değerlendirilmesi..... 91
5.3.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 92
5.3.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... 103
5.3.3. Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi 106
5.4. Sonuç ve Öneriler 107
KAYNAKLAR..... 112
ÖZGEÇMİŞ..... 119
TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER 120

SİMGELER DİZİNİ

J	Joule
K	Kelvin
kJ	Kilojoule
MPa	Megapaskal
N	Newton
Pa	Pascal
Pa-s	Pascal-saniye

KISALTMALAR DİZİNİ

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AM	Katmanlı üretim
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
DIW	Doğrudan mürekkep yazdırma
DLP	Dijital ışıkla işleme
FDM	Eriyik yığma yöntemi
FTIR	Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi
F-REF	Referans PLA filament numune
F-25	25 °C suda şartlandırılmış PLA filament numune
F-2580	25 °C ve %80 nemli ortamda şartlandırılmış PLA filament numune
FG-F-REF	Referans PLA/Grafit kompozit filament numune
FG-F-2580	25 °C ve %80 nemli ortamda şartlandırılmış PLA/Grafit kompozit filament numune
FK-25	25 °C suda şartlandırılmış PLA filamentten basılmış kemik numune
FK-2580	25 °C ve %80 nemli ortamda şartlandırılmış PLA filamentten basılmış kemik numune
FP-F-REF	Referans PLA/PHB kompozit filament numune
FP-F-2580	25 °C ve %80 nemli ortamda şartlandırılmış PLA/PHB kompozit filament numune

ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
K-REF	Referans PLA filamentten basılmış kemik numune
K-25	25 °C suda şartlandırılmış PLA kemik numune
K-2580	25 °C ve %80 nemli ortamda şartlandırılmış PLA kemik numune
KG-REF	PLA/Grafit kompozit filamentten basılmış referans kemik numune
KG-FK-2580	25 °C ve %80 nemli ortamda şartlandırılmış PLA/Grafit kompozit filamentten basılmış kemik numune
KP-REF	PLA/PHB kompozit filamentten basılmış referans kemik numune
KP-FK-2580	25 °C ve %80 nemli ortamda şartlandırılmış PLA/PHB kompozit filamentten basılmış kemik numune
PHB	Polihidroksibütirat
PLA	Poli(Laktik Asit)
Ra	Yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalaması (ortalama pürüzlülük değeri)
RH	Bağıl nem
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SLA	Stereolitografi
SLS	Seçici lazer sinterleme
STL	Üç boyutlu baskı dosyası formatı
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
UV	Ultraviyole
3B	Üç boyutlu
3DP	Bağlayıcı püskürtme

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ticari bir amorf PLA'nın genel özellikleri (Farah, Anderson & Langer, 2016). 4

Çizelge 2.2. PLA/Grafit kompozit filamentin mekanik özellikleri (Fiberlogy, 2018). 9

Çizelge 2.3. PLA/PHB kompozit filamentin mekanik özellikleri (Fillamentum, 2021). 12

Çizelge 2.4. PLA filamentin özellikleri. 14

Çizelge 2.5. ABS filamentin özellikleri. 15

Çizelge 2.6. PLA ve ABS cinsi filamentlerin özelliklerinin karşılaştırılması. 16

Çizelge 2.7. Eklemeli imalat yöntemlerinin ASTM standartına göre sınıflandırılması (Lee, An & Chua, 2017)..... 18

Çizelge 2.8. 3B yazıcı çeşitlerinin genel özellikleri (Quanjin vd., 2020). 19

Çizelge 2.9. Creality marka CR-10 S4 tipi yazıcının teknik özellikleri. 25

Çizelge 4.1. PLA filamentin teknik özellikleri. 43

Çizelge 4.2. PLA/PHB kompozit filamentin teknik özellikleri. 44

Çizelge 4.3. PLA/Grafit kompozit filamentin teknik özellikleri. 44

Çizelge 4.4. PLA numuneleri, PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit numuneleri yazdırmak için kullanılan yazdırma paremetreleri. 50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. PLA polimerizasyonu (Bajpai, Singh & Madaan 2014). 3

Şekil 2.2. PLA ve PHB'nin kimyasal yapıları. 10

Şekil 2.3. PLA filament ile yazdırılan kalibrasyon kübü. 14

Şekil 2.4. 3B yazıcı parametrelerinin sınıflandırılması (Prabhakar vd., 2020). 20

Şekil 2.5. 3B biyobaskı (Mashambanhaka, 2018). 21

Şekil 2.6. FDM yazdırma teknolojisi çalışma prensibi (Yuanyuan vd., 2017). 22

Şekil 2.7. FDM teknolojili ev tipi bir 3B yazıcı. 23

Şekil 2.8. Üç boyutlu yazıcının genel parçaları (3dprinteruniverse, 2021). 26

Şekil 4.1. Creality CR-10 S4 3B FDM yazıcı. 45

Şekil 4.2.Yazıcı tablası üzerine yapıştırılmış buildtak. 46

Şekil 4.3. Su içerisinde şartlandırmanın yapıldığı sistem. 46

Şekil 4.4. İklimlendirme kabini içindeki numuneler. 47

Şekil 4.5. Tinius Olsen marka H10KS materyal test cihazı. 47

Şekil 4.6. PCE-RT 10 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı. 48

Şekil 4.7. Çekme numunesi. 49

Şekil 4.8. ASTM D638-14 Tip I'e göre çekme (kemik) numunesi boyutları. 49

Şekil 4. 9. Ultimaker Cura yazılımında yazdırma parametrelerinin ayarlanması. 50

Şekil 4.10. Kemik numunelerin yazdırılması. 51

Şekil 4.11. Kemik ve filament numunelerin çekme deneyi. 52

Şekil 5.1. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 54

Şekil 5.2. 25 °C sıcaklıktaki suda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 55

Şekil 5.3. 25 °C sıcaklıktaki suda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 55

Şekil 5.4. 25 °C sıcaklıktaki suda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 56

Şekil 5.5. 25 °C sıcaklıktaki suda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 56

Şekil 5.6. Referans ve 25 °C su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 57

Şekil 5.7. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 58

Şekil 5.8. 25 °C sıcaklıktaki suda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 58

Şekil 5.9. 25 °C sıcaklıktaki suda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 59

Şekil 5.10. 25 °C sıcaklıktaki suda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 59

Şekil 5.11. 25 °C sıcaklıktaki suda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 60

Şekil 5.12. Referans ve 25 °C su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 61

Şekil 5.13. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. ... 62

Şekil 5.14. 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. ... 62

Şekil 5.15. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 64

Şekil 5.16. 25 °C sıcaklıktaki suda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 64

Şekil 5.17. 25 °C sıcaklıktaki suda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 65

Şekil 5.18. 25 °C sıcaklıktaki suda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 65

Şekil 5.19. 25 °C sıcaklıktaki suda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 66

Şekil 5.20. Referans ve 25 °C su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 67

Şekil 5.21. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. ... 67

Şekil 5.22. 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 68

Şekil 5.23. Referans ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filament numunelerin FTIR analizleri. 69

Şekil 5.24. Referans ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filamentten üretilen kemik numunelerin FTIR analizleri. 70

Şekil 5.25. Referans ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA kemik numunelerin FTIR analizleri. 71

Şekil 5.26. Referans, 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA kemik ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri. . 72

Şekil 5.27. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 73

Şekil 5.28. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 74

Şekil 5.29. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 74

Şekil 5.30. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 75

Şekil 5.31. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 75

Şekil 5.32. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları. 76

Şekil 5.33. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 77

Şekil 5.34. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 78

Şekil 5.35. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 78

Şekil 5.36. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 79

Şekil 5.37. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 79

Şekil 5.38. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 80

Şekil 5.39. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. ... 81

Şekil 5.40. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 82

Şekil 5.41. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 83

Şekil 5.42. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 83

Şekil 5.43. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 84

Şekil 5.44. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 84

Şekil 5.45. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 85

Şekil 5.46. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları. 86

Şekil 5.47. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. ... 86

Şekil 5.48. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 87

Şekil 5.49. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filament numunelerin FTIR analizleri. 88

Şekil 5.50. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filamentten üretilen kemik numunelerin FTIR analizleri. 89

Şekil 5.51. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA kemik numunelerin FTIR analizleri. 90

Şekil 5.52. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde bekletilmiş PLA kemik ve aynı ortamda bekletilen PLA filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri. 91

Şekil 5.53. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA/Grafit kompozit filament numunelerin çekme dayanımları. 92

Şekil 5.54. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filament numunelerin çekme dayanımları. 93

Şekil 5.55. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA/PHB kompozit filament numunelerin çekme dayanımları. 94

Şekil 5.56. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filament numunelerin çekme dayanımları. 94

Şekil 5.57. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filament numunelerin çekme dayanımları. 95

Şekil 5.58. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 96

Şekil 5.59. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 97

Şekil 5.60. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 98

Şekil 5.61. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 98

Şekil 5.62. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları. 99

Şekil 5.63. Şartlandırılmamış PLA/Grafit kompozit filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 100

Şekil 5.64. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 100

Şekil 5.65. Şartlandırılmamış PLA/PHB kompozit filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 102

Şekil 5.66. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 102

Şekil 5.67. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filament numunelerin FTIR analizleri. 103

Şekil 5.68. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunelerin FTIR analizleri. 104

Şekil 5.69. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/PHB kompozit filament numunelerin FTIR analizleri. 105

Şekil 5.70. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin FTIR analizleri. 105

Şekil 5.71. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit, PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri. 107

Şekil 5.72. Tüm filament numunelerin çekme dayanımları. 108

Şekil 5.73. Referans ve şartlandırılmış filamentten basılan tüm kemik numunelerin çekme dayanımları. 109

Şekil 5.74. Referans ve şartlandırılmış tüm kemik numunelerin çekme dayanımları. . 110

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Üç boyutlu (3B) baskı teknolojisi yenilikçi, çok yönlü bir teknoloji aşaması olarak ortaya çıkmış ve üretim verimliliğini artırmak için yeni fırsatlar açmıştır. 1980'lerden beri var olan 3B baskı teknolojileri makine, malzeme ve yazılımdaki hızlı gelişmelerin neticesinde daha geniş bir kullanıcı yelpazesi için erişilebilir hale gelmiştir. Günümüzde bir masaüstü 3B yazıcının maliyeti hem bireysel kullanıcılar için hem de endüstriyel kullanıcılar için karşılanabilir seviyededir. Mevcut profesyonel, düşük maliyetli masaüstü ve tezgahüstü 3B yazıcılar inovasyonu hızlandırmakta ve mühendislik, imalat, diş hekimliği, sağlık, eğitim, eğlence, mücevher ve odyoloji gibi çeşitli sektörlerdeki işletmeler tarafından kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra evlerinde birçok amatör kullanıcı iş veya hobi amaçlı olarak bu yazıcıları kullanmaktadır (Low vd., 2017; Savini & Savini, 2015).

3B baskıda hem amatörler hem de profesyonel kullanıcılar tarafından kullanılan en yaygın biyobozunur filament poli(laktik asit) (PLA) filamentidir. Birçok masaüstü 3B yazıcı için "varsayılan" biyobozunur malzemedir. PLA şeker kamışı, patates nişastası, mısır nişastası ve tapyoka kökleri gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilen bir termoplastiktir. Bu 3B baskı filamenti diğer plastik malzemelere kıyasla çevre dostu bir malzemedir. PLA filamenti yazdırma esnasında toksik koku üretmez, bu nedenle kapalı ortamlarda kullanımı güvenlidir. PLA filamentin yazdırılması çok kolaydır ve nadiren sorunlara neden olur (Allthat3d, 2021; All3dp, 2021; Martin, 2021; MatterHackers, 2021; 3dinsider, 2021).

PLA filamentlerde en çok karşılaşılan problem filamentlerin nem, su, sıcaklık gibi çevresel şartlara maruz kalmaları ile baskı kalitelerindeki olumsuz değişimler ve

buna bağlı olarak mekanik dayanımlarının azalmasıdır. Ticari PLA filamentin bu şartlar altında kullanım sınırlarının belirlenmesi bilimsel olarak oldukça cazip çalışma konusudur. Bu çalışmada PLA filamentlerin çevresel şartlar altında uzun süreli kullanılabilirliğinin araştırılması, bu kullanım sınırlarının tespiti ve bu şartların olumsuz etkisini azaltabilecek alternatif kompozit filamentlerin aynı koşullarda mekanik özelliklerinin belirlenmesi araştırma problemi olarak seçilmiştir.

PLA filamentin çeşitli çevresel şartlara maruz kaldıktan sonra dayanımının ve baskı kalitesinin nasıl değiştiğinin tespit edilmesi için PLA, kompozit PLA filamentler çeşitli ortamlara maruz bırakılmış ve çeşitli mekanik testler uygulanmıştır. Filamentler 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15, 20 gün süre ile bekletilmişlerdir. Bu ortamlarda şartlandırılmış filamentlerden çeşitli numuneler üretilmiştir. Filamentlerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için bu filament numunelere çekme testi uygulanmış ve ayrıca baskı sonrasındaki dayanım değişimini görmek için şartlandırılmış filamentlerden standart kemik çekme numuneleri basılmış ve çekme testine tabi tutulmuşlardır.

Tez çalışmasında araştırılan diğer bir konu ise baskı kalitesindeki değişimdir. Bunun için baskısı alınan çekme numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca çevresel şartların filamentler üzerindeki kimyasal etkisini değerlendirmek için farklı çevresel şartlara maruz kalmış filamentlere ve bu filamentlerden basılan numunelere FTIR analizleri yapılmıştır.

PLA ve kompozit filamentlerinin çevresel şartlar altında nasıl bir değişime uğradığının değerlendirilebilmesi için bu tez çalışmasında deneysel parametrik çalışmalar yapılarak literatürdeki bu eksikliğin doldurulmasına katkıda bulunulduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu filamentlerin mekanik ve baskı özelliklerini çevresel şartların nasıl etkilediği konusunda ülkemizde de bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışma ile ev veya endüstriyel alanlarda PLA ve PLA kompozit filamentlerini tercih eden kullanıcıların bu filamentleri daha verimli kullanılmasında ayrıca filament üreticilerinin ürünlerini iyileştirmesinde yeterli bilgi birikiminin oluşmasına fayda sağlanacaktır.

.

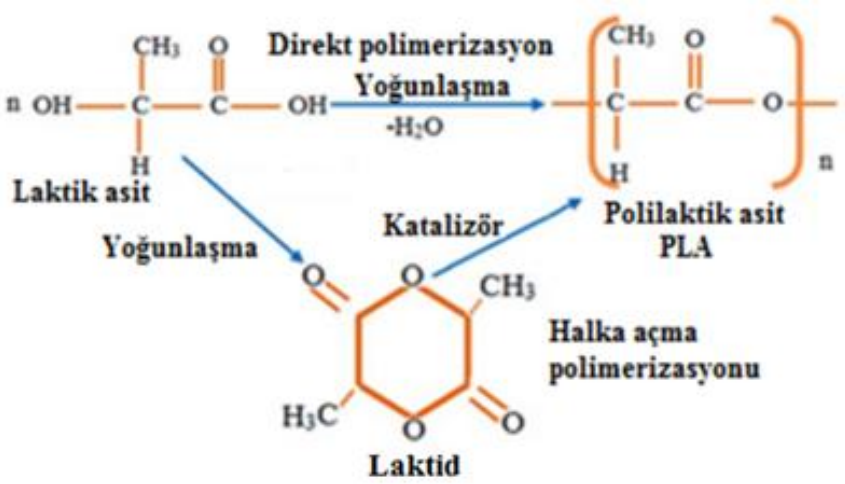
BÖLÜM 2

KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Poli(Laktik Asit) (PLA)

Sağlık ve çevresel tehlikelerle ilgili endişeler, endüstrileri parçalanamayan petrol bazlı polimerler yerine parçalanabilir ve yenilenebilir kaynak bazlı biyopolimer arayışına zorlamıştır. Tehlikeli atık ve karbondioksit (CO_2) emisyonlarını önemli ölçüde azaltacak malzemelerden biri olarak PLA örnek verilebilir (Sajna, Mohanty & Nayak, 2017).

PLA %100 yenilenebilir kaynaklardan elde edilen çok yönlü, biyolojik olarak parçalanabilen, alifatik bir polyesterdir (Lopes, Jardini & Filho, 2012). PLA yarı kristal veya tamamen amorf olabilen termoplastik bir biyopolimerdir; mısır, şeker gibi tarımsal ürünlerin neredeyse tamamının fermantasyonu yoluyla laktik asitten üretilir (Şekil 2.1). PLA hem siklik laktidin halka açılım polimerizasyonu hem de laktik asidin doğrudan yoğunlaştırılması ile hazırlanabilir (Bajpai, Singh & Madaan 2014).



Şekil 2.1. PLA polimerizasyonu (Bajpai, Singh & Madaan 2014).

PLA, 1932 yılında laktik asidi vakum altında ısıtarak düşük moleküler ağırlıklı bir ürün üreten Carothers (DuPont) tarafından keşfedilmiştir. 1954'te DuPont, moleküler ağırlığı daha büyük olan patentli polimeri üretmiştir (Çizelge 2.1) (Drumright, Gruber & Henton, 2000).

Çizelge 2.1. Ticari bir amorf PLA'nın genel özellikleri (Farah, Anderson & Langer, 2016).

Özellikler	**Birim**	**Değer**
Fiziksel:		
Özgül ağırlık	-	1.27
Katı yoğunluğu	g/cm^3	1.252
Eriyik yoğunluğu	g/cm^3	1.073
Camsı geçiş sıcaklığı (T_g)	^oC	55
Erime sıcaklığı (T_m)	^oC	165
Özgül ısı (C_p)	J/kg°C	
190 °C		2060
100 °C		1955
55 °C		1590
Optik:		
UV ışık iletimi		
190 – 220 nm		<5%
225 – 250 nm		85%
>300 nm		95%
Görünür ışık iletimi		95%
Mekanik:		
Çekme dayanımı	MPa	59
Kopmada uzama	%	7
Elastik modülü	MPa	3500
Kesme modülü	Mpa	1287
Poisson oranı	-	0.36
Akma dayanımı	MPA	70
Bükülme dayanımı	MPa	106
Rockwell sertliği	HR	88
Maksimum çekme dayanımı	MPa	73
Uzama yüzdesi	%	11.3
Young modülü	MPa	1280
Reolojik:		
Çapraz WLF viskozite modeli:		
n		0.25
Tau	Pa	$1.00861x10^5$
D1	Pa-s	$3.31719x10^9$
D2	K	373
D3	K/P	0
A1		20.2
A2	K	51.6

Bu çevre dostu polimer, yüksek çekme mukavemeti, yüksek Young modülü ve yüksek şeffaflık özellikleri ile 3B yazıcılarda filament, ambalaj, ev ürünleri, diş telleri, yara örtüleri, dikişler, otomotiv, havacılık, endüstri ve tıp alanlarındaki birçok uygulamada tercih edilen bir seçenek olmuştur. Biyopolimerlerin faydalı olabilmesi için malzeme özelliklerinin de mühendislik kısıtlamalarını karşılayacak şekilde ayarlanabilmesi gerekmektedir. Bu sebeple PLA'ların özellikleri kapsamlı araştırmaların da konusu olmuştur (Baran & Erbil, 2019; Lopes, Jardini & Filho, 2012).

PLA çevresel etkiler ile bozunabilen bir polimerdir. Biyotik ve biyotik olmayan işlemlerin bir arada bulunması nedeniyle polimer bozunma mekanizmasının tamamı, çoğu durumda çevresel bozunma olarak da adlandırılabilir. PLA hidrofilik özelliklerinden dolayı, nemi emme eğilimindedir. Bu durum da PLA'nın mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi diğer özelliklerinde de bir değişikliğe yol açar **(**Tantothai & Suppakul, 2013). PLA, neme maruz kaldıktan sonra öncelikle hidroliz nedeni ile bozunur. Poli(laktik asit) yıkımı iki adımda gerçekleşir. İlk olarak, ester gruplarının rastgele enzimatik olmayan zincir kopması, moleküler ağırlıkta bir azalmaya yol açar. İkinci olarak, laktik asit ve düşük moleküler ağırlıklı oligomerler, karbondioksit ve su vermek üzere mikroorganizmalar tarafından doğal olarak metabolize edilene kadar moleküler ağırlık azalır (Lopes, Jardini & Filho, 2012).

2.2. Kompozit Malzemeler

Birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha çok malzemenin bir araya getirilmesi ile elde edilen yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Böylelikle istenilen özelliklere sahip yeni bir malzeme elde edilmiş olur. Kompozitler malzemelerde ayrı ayrı bulunan ve istenen özelikleri tek bir yapıda karşılayabilir. Örneğin tek bir kompozit malzeme çelik kadar mukavemetli, alüminyum gibi korozyon dayanımlı ve bir plastik kadar hafif olabilir. Ayrıca kompozitler ile yorulma dayanımı, ısıl genleşme, ısıya dayanım, tokluk, yalıtım, rijitlik, elektrik iletkenliği, vb. özelliklerin bazılarının tek bir malzemede birleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu sebeple günümüzde teknoloji ve sanayide artan ihtiyaçlar doğrultusunda havacılık, tıp, gıda ve inşaat gibi birçok alanda kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Aydın & Altun, 2020; Çelik, 2019).

Kompozit malzemeler;

- Birbirleri içinde çözünmemiş ve farklı kimyasal yapıya sahip bileşenlerden meydana gelmiş,
- İki veya daha çok molekül, faz yapıları veya kristallerin bir arada bulunduğu,
- Malzemelerin içeriklerinin üç boyutlu olarak birleşmelerinden oluşmuş,
- Kompozit malzemeyi oluşturan içeriklerin tek başlarına sahip olamayacakları özelliklerden daha iyi özelliklere sahip yapıdadırlar (Akın, 2007).

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre avantajları, içeriklerinin sahip oldukları en iyi özellikleri bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerin oluşturulması ile aşağıdaki özelliklerin herhangi birisinin veya bu özelliklerin birkaçının iyileştirilmesi amaçlanır:

- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Mukavemet
- Yorulma mukavemeti
- Aşınma mukavemeti
- Yüksek sıcaklık altındaki özellikler
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Fiyat
- Akustik yalıtım
- Estetik görünüm
- Ağırlık
- Rijitlik (Erbay, 2009).

Yukarıda verilen iyi özelliklerine rağmen bazı kompozit malzemelerin olumsuz özellikleri de olabilir. Bunlar;

- Üretimdeki güçlük,
- Yüksek fiyatlar,
- Malzemeyi işlemedeki güçlükler, işleme maliyetlerinin yüksek oluşu ve istenen değerdeki yüzey pürüzlüklerinin elde edilmesindeki problemler,

- Geri dönüştürülebilir olmayışları (Sınıksaran, 2012).

Kompozitlerin içerisinde polimer kompozitler yüksek dayanım, termal ve boyutsal kararlılık, aşınmaya karşı direnç ve sertlik gibi özellikleriyle kullanıcılara çok sayıda avantaj sunarlar. Mukavemet ve sertlikleri ile bazı polimer kompozit malzemeler metallerle yarışabilecek düzeydedirler ve onlardan daha hafiftirler (Sınıksaran, 2012).

2.2.1. PLA Kompozitler

PLA'nın mekanik ve baskı kalitesini arttırmak amacı ile kompozit PLA'lar üretilip kullanılmaktadır. Üretilen kompozit PLA'lar ile kullanılan ürünlerin ömrü artmakta, üstün mekanik özellikleri ile kullanım alanı genişlemektedir. Özel tasarlanmış kompozit PLA'lar ile sürtünme direnci minimize edilerek aşınma dayanımı arttırılmış mekanizmalar tasarlanabilmektedir (Filameon, 2021).

PLA ile sağlığa zararsız kullanıcı dostu ürünler elde edilebilmekte bu da kullanıcıların evsel kullanımlarda bu malzemelerden üretilen ürünleri tercih etmesine imkan sağlamaktadır. Bu durumda kullanılan PLA miktarı artacak; endüstriyel kompost ve elektrikli kompostlarda %100 biyolojik olarak parçalanabilir kompozit PLA'lar sayesinde de çevreye plastiklerden çok daha az zarar verilmiş olacaktır (Fillamentum, 2021).

Poli(laktik asit), çoğu termoplastik gibi lif ve film haline getirilebilir (Lopes, Jardini & Filho, 2012). Bu nedenle çoğu uygulamaların yanı sıra 3B yazıcılarda da filament olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Moetazedian vd., 2019). PLA kullanımının önemi, çevre ve insan sağlığını koruyan, kaliteli ürünler sunmak isteyen birçok plastik sanayi firması için ilgi odağı olmuştur. Bu nedenle PLA, 3B baskı için biyomalzemelerde gelecekteki gelişmeler için kullanılabilir. PLA kompozit çeşitleri daha yüksek stabilite gibi daha iyi özelliklere sahip geniş bir uygulama yelpazesi sunarak, ticari ve akademik araştırmalarda bir dizi yeni uygulama ve ürün sunabilir. Sonuç olarak PLA ve kompozitleri farklı endüstriler için istenen özellikleri elde etmek için değiştirilebilir veya ayarlanabilir (Gutierrez, 2016).

2.2.1.1. PLA/Grafit Kompozitler

Doğada bol miktarda bulunan grafit son yıllarda iletken polimer kompozitlerin hazırlanmasında elektronik iletken bir dolgu maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Chen vd., 2003; Murariu vd., 2010).

Grafitin mükemmel korozyon direnci ve düşük kütle direnci gibi avantajları vardır. Öte yandan işlemedeki zorlukları dezavantaj olarak söylenebilir (Mathur vd., 2008).

PLA'yı modifiye etmek için kullanılan katkı maddelerinden biri, düşük fiyatı ve mükemmel termal ve elektriksel özellikleri nedeniyle grafittir. Ayrıca, rekabetçi çok işlevli özelliklere sahip polimer kompozitlerin üretimi için bir dolgu maddesi olarak kullanılabilir (Przekop vd., 2020).

PLA+Grafit kompozit filamentlerin ana özellikleri;

- Çevre dostu,
- Yüksek aşınma mukavemeti,
- Düşük sürtünme katsayısı,
- Kendinden yağlayıcı olması,
- Yüksek dayanım-yoğunluk oranı,
- Gelişmiş mekanik özellikler,
- Kullanım ömrünün uzunluğu,
- İyi yüzey kalitesi,
- İyi rijitlik,
- Karmaşık yapıdaki baskılarda iyi sonuçlar,
- Kullanıcı dostu olmasıdır (Filameon, 2021).

Ayrıca grafit, polimerik malzemelerin tribolojik (yüzey sürtünmesi ve aşınması) özelliklerini çok iyi geliştirir. PLA'nın içerisine Grafit ilavesi, elde edilen kompozitlerin hidrofobik özelliklerinde önemli bir artışa neden olur. Grafit çevre için pratik olarak nötrdür bu nedenle eklenmesi PLA'nın biyolojik olarak parçalanabilirliğinin faydalarını ortadan kaldırmaz (Przekop vd., 2020). 3B yazıcılarda PLA/Grafit kompozit filamentler; sürtünmeye maruz kalan makine parçalarının (dişli çarklar), prototiplerin, kalıpların ve modellerin üretiminde ayrıca yüksek dayanımın yanında hafifliğin önemli

olduğu uygulamalarda kullanılabilir. PLA/Grafit kompozit filamentin mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. PLA/Grafit kompozit filamentin mekanik özellikleri (Fiberlogy, 2018).

	Değer	**Test Yöntemi**
Mekanik Özellikler		
Özgül Ağırlık	1.22 g/cm^3	D 792
Çekme Mukavemeti	40 MPa	D 638
Çekme Modülü	2865 MPa	D 790
Eğilme Mukavemeti	73 MPa	D 790
Eğilme Modülü	2414 MPa	D 790
Reolojik Özellikler		
Eriyik akış oranı (210 °C/2.16 kg)	9-15 g/10 dk	D 1238

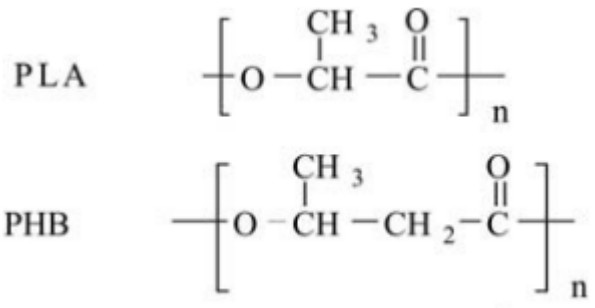
2.2.1.2. PLA/PHB Kompozitler

1920'lerin başında Lemoigne tarafından bakterilerde keşfedilen bir biyoplastik olan polihidroksibütirat (PHB), polihidroksialkanoatlar (PHA) olarak bilinen bir polimer ailesine aittir. Canlı hücrelerden elde edilen PHB, polipropilene (PP) belirgin bir benzerlik gösteren, %100 biyolojik olarak parçalanabilen bir termoplastiktir ve fosil kaynaklı polimerlerin yerini alma potansiyeline sahiptir. Birçok bakteri PHB üretir ve onu hücre içinde bir enerji kaynağı olarak depolar (Yashavanth, Das & Maiti, 2021). PHB'nin çevreye bırakıldığında tamamının parçalanabilmesi, çevre kirliliği oluşturmaması gibi özelliklerinden dolayı ticari ve endüstriyel uygulamalar için önemleri gün geçtikçe artmaktadır. Optik saflık, suda çözünmemesi ve neme dirençli olması gibi çok sayıdaki kullanışlı özellikleriyle PHB, neme duyarlı veya suda çözünen, biyolojik olarak parçalanabilen diğer plastiklerden farklıdır. Diğer yandan PHB oksijene karşı da oldukça dayanıklıdır. PHB'nin UV ışınlarına karşı dirençli olduğu fakat asit ve baz uygulamalarına karşı dayanımının düşük olduğu yapılan araştırmalarla kanıtlanmıştır (Dinigüzel, 2007; Du & Webb, 2011).

PHB ekstrüde edilebilir, kalıplanabilir, liflere bükülebilir, film haline getirilebilir ve sentetik polimerlerle karıştırılabilir (biyoplastiklerin fiziksel özelliklerini geliştirmek için). Ayrıca vücut dokularıyla da uyumlu olması PHB'nin cerrahi dikişler, yara örtüleri ve oküler cihazlar gibi tıbbi alanlarda kullanımını mümkün kılar. Toksik olmaması, termoplastik işlenebilirliği, biyolojik olarak parçalanabilir ve biyolojik olarak uyumlu

yapısı, PHB'nin kullanımını doku mühendisliğinden ilaç dağıtımına kadar biyomedikal uygulamalarda faydalı kılar (Rathore, 2014; Yashavanth, Das & Maiti, 2021).

PHB tarım ve inşaat malzemeleri, otomotiv iç malzemeleri, elektrikli cihazlar, şişeler ve kaplar, sıhhi ürünler, genel ambalaj malzemeleri, vb. gibi çok sayıda uygulamada kullanılabilir. Ancak PHB genellikle düşük direnç ve dayanıklılığı nedeniyle, petrol bazlı plastiklerin yerini alamaz. PHB'nin kırılganlığı, zayıf işlenebilirliği ve şekillendirilebilirliği, hem aerobik hem de anaerobik koşullar altında tamamen biyolojik olarak parçalanması endüstriyel kullanımlarını sınırlar. PHB içerikli üretilen kompozit yapılar bu sorunun çözümü olabilir. PHB'nin PLA ile harmanlanması, PLA'nın özelliklerini geliştirirken aynı zamanda PHB'yi pazara sunmanın alternatif bir yolunu temsil eder. Bu bağlamda PLA/PHB biyopolimerlerinin kombinasyonu eko-sürdürülebilirliklerini korurken, tek bileşenlere kıyasla gelişmiş özelliklere sahip yeni biyomalzemelerin elde edilmesine izin verdiği için büyük bir ilgi kazanmıştır. Benzer bir erime sıcaklığı ve yüksek kristallik ile PHB, PLA ile karıştırmak için idealdir (Şekil 2.2) (Arrieta vd., 2017; D'Anna, Arrigo & Frache, 2019; Rathore, 2014).



Şekil 2.2. PLA ve PHB'nin kimyasal yapıları.

Kristal fazın mekanik ve geçirgenlik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir; bu yüzden PLA'nın kristalliğini artırmak için önemli akademik ve endüstriyel araştırma çabalarına odaklanılmıştır. Bu anlamda yüksek kristalli bir biyopolimer olan PHB'nin PLA matrisine eriyik karıştırma yoluyla eklenmesi, PLA kristalliğini arttırmanın ve özelliklerini düzenlemenin kolay bir yolu olarak kabul edilmiştir. Yüksek derecede kristallik ile poli(hidroksialkanoatların) (PHA) en yaygın temsilcisi olan PHB, kısa süreli gıda ambalajlama uygulamaları için de önerilmiştir. Gıda ürünlerini depolama sırasında nem ve nemin etkilerinden korumak ve PLA

matrisinin hidrofobikliğini artırmak için çeşitli çabalar sarf edilmiştir. Bu anlamda PLA-PHB karışımları azaltılmış su afinitesi ile hidrofobik karakterlerinde önemli bir gelişme göstermiştir. Tüm bu bulgular sistemdeki genel kristalliği artırmak için PLA'yı PHB ile karıştırmanın avantajını vurgulamaktadır. Kristaller küçük moleküller için daha dolambaçlı bir yol oluştururken aynı zamanda geliştirilen kristalitler daha çok amorf zincirleri çevreleyerek hareketlerini kısıtlar ve küçük molekül erişimini azaltır. Bu nedenle PLA-PHB bazlı formülasyonlar, gıda paketleme amaçları için çekici sonuçlar verir; oksijene karşı bariyer, oksidatif süreçleri önlemek veya azaltmak ve ayrıca düşük nem gereksinimleri için kritik öneme sahiptir. PHB, PLA'yı kristalize ederek daha yüksek bariyer performansına ve daha iyi mekanik dirence sahip malzemelere yol açabilir. Plastikleştirilmiş PLA-PHB sistemleri kompozitler ve nanokompozitler dahil olmak üzere şu anda kullanılan eriyik işleme teknolojileri ile hazırlanabilen umut verici malzemelerdir (Arrieta vd., 2014; Arrieta vd., 2017; D'Anna, Arrigo & Frache, 2019).

Spesifik taşıma davranışları, uygun mekanik özellikler, gelişmiş işlevsellik ve ayrıca kontrollü biyobozunabilirlik sayesinde her iki biyopolimer kategorisi de biyotıp, çevre iyileştirme ve özellikle ambalaj endüstrisi gibi yenilikçi alanlarda sentetik plastiklerin yerini alacak şekilde belirlenmiştir (Siracusa vd., 2020).

Farklı karışım oranlarına ve buna bağlı olarak farklı özellikler sahip olan PLA/PHB kompozit filamentlerinin piyasada örnekleri mevcuttur (Çizelge 2.3). PLA/PHB kompozit filamentlerin ana özellikleri;

- %100 yenilenebilir kaynaklardan elde edilen polimerlerden yapılmıştır (biyo-bazlı),
- Yüksek mukavemet, tokluk, sertlik,
- 110 °C'ye kadar sıcaklık dayanımı – 3B baskıdan hemen sonra tavlamaya gerek yoktur,
- PLA ile karşılaştırılabilir kolay 3B baskı özellikleri,
- Basılı nesnenin uzun süreli dayanıklılığı,
- Gıda ile temas eden uygulamalar için güvenli,
- Üretilen parçalar bulaşık makinesinde yıkanabilir,
- Bariyer özellikleri,
- Doğal ipeksi görünüm,

Çizelge 2.3. PLA/PHB kompozit filamentin mekanik özellikleri (Fillamentum, 2021).

	Değer	**Test Yöntemi**	**Test Koşulu**
Fiziksel özellikler			
Yoğunluk	1.20 g/cm^3	ISO 1183	
	1.05 g/cm^3	ISO 1133	
Eriyik akış oranı	5.8 g/10 dk	ISO 1133	180 °C, 2.16 kg
	12.6 g/10 dk	ISO 1133	190 °C, 2.16 kg
Mekanik Özellikler			
Çekme mukavemeti	38.6 MPa	ISO 527	akmada
	31.2 MPa	ISO 527	kırılmada
Kırılmada uzama	7.7 %	ISO 527	
Çekme modülü	1900 MPa	ISO 527	
Çharpy darbe mukavemeti	25.6 kJ/m^2	ISO 179	23 °C, çentiksiz
	2.4 kJ/m^2	ISO 179	23 °C, çentikli
Sertlik	71 Shore D	ISO 868	
Termal özellikler			
Isıl bozulma sıcaklığı	119 °C	ISO 75	0.45 MPa
Vicat yumuşama sıcaklığı	150 °C	ISO 306	Metot A, 10 N, 50 °C/saat
Kimyasal özellikler			
Polimer tabanlı	Poli(laktik asit) ve polihidroksibütirat bileşiği		

- Endüstriyel kompost ve elektrikli kompostlarda %100 biyolojik olarak parçalanabilir,
- Kompostta ayrışma PLA'dan yaklaşık 3 kat daha hızlıdır,
- Biyobozunma sırasında çevreyi kirletici hiçbir mikroplastik oluşturulmaz,
- Sadece biyolojik olarak aktif bir ortamda ayrışır,
- Ayrışma sürecinden kaynaklanan yan ürünler sera etkisine neden olmaz,
- Polimer, özellikleri korunarak birçok kez geri dönüştürülebilir; olmasıdır (Fillamentum, 2021).

3B yazıcılarda PLA/PHB kompozit filamentler tokluğun, sıcaklık direncinin ve özellikle biyolojik olarak parçalanabilirliğin önemli olduğu uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca bu filament döngüsel ekonomi ilkelerine mükemmel uyum sağlar;

birçok kez yeniden kullanılabilir, bu sayede filament atıkları ve kullanım ömrü biten parçalar geri dönüştürülebilir (Fillamentum, 2021).

2.3. 3B Yazıcılarda Kullanılan Filamentler

3B yazıcılarda ev kullanıcıları ve endüstriyel kullanıcılar tarafından kullanılan çok çeşitli filamentler mevcuttur. Tüm filamentlerin kendilerine özgü fiziksel, mekanik özellikleri vardır. Farklı çalışma şartları için farklı filamentler kullanıcılar tarafından tercih edilmektedir. Bu bölümde ev kullanıcıları ve endüstriyel kullanıcılar tarafından kullanımı sıklıkla tercih edilen filamentlerden en yaygın biyobozunur PLA ve petrol kökenli ABS hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

2.3.1. PLA

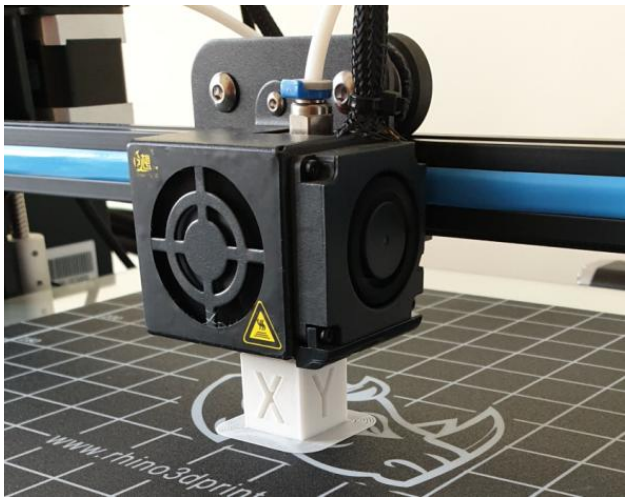
PLA filamenti en yaygın kullanılan biyobozunur masaüstü 3B baskı filamentidir. Genellikle kokusuz bir filament olarak kabul edilir ancak PLA türüne bağlı olarak baskı sırasında tatlı şeker benzeri koku oluşabilir. PLA filamenti yazdırma sırasında toksik koku üretmez, iş ve ev ortamında kullanımı güvenlidir (Allthat3d, 2021; All3dp, 2021). PLA filamente ait özellikler Çizelge 2.4'te verilmiştir.

PLA filamentin yazdırılması çok kolaydır ve nadiren sorunlara neden olur. Diğer filamentlere nazaran düşük bir baskı sıcaklığına sahiptir ve genellikle bir ısıtma yatağı gerektirmez. PLA'dan yapılan nesneler diğer filamentlere göre daha kolay kırılır. Bu nedenle PLA güçlü mekanik etkilere dayanması gereken nesneleri basmak için uygun değildir. PLA 60 °C'den itibaren eridiği için yüksek sıcaklıklara maruz kalan bileşenlerin yazdırılmasında da kullanılmamalıdır. Bu uygulamalar dışındaki diğer tüm uygulamalar için 3B yazıcılarda PLA ile yazdırma önerilir (Martin, 2021).

PLA hem amatörler hem de profesyoneller için popülerdir. Birçok masaüstü 3B yazıcı için önerilen malzemedir. PLA filamentinin bir başka çekici yönü, neredeyse sonsuz sayıda renk ve stilde mevcut olmasıdır (Şekil 2.3). Özel filamentlerin çoğunda; iletken, karanlıkta parlayan özelliklere sahip olanlar veya ahşap, metal ile doldurulmuş olanlar gibi temel malzeme olarak PLA kullanır (All3dp, 2021; MatterHackers, 2021; 3dinsider, 2021).

Çizelge 2.4. PLA filamentin özellikleri (Allthat3d, 2021; All3dp, 2021; Martin, 2021; MatterHackers, 2021; 3dinsider, 2021).

Dayanım	Orta
Esneklik	Düşük
Durabilite	Orta
Baskı zorluğu	Düşük
Baskı sıcaklığı (°C)	180-230
Tabla sıcaklığı (°C)	20-60
Tabla yüzeyi	Cam, mavi maskeleme bantı, PEI, yapıştırıcı, saç spreyi
Büzülme/çarpılma	Düşük
Çözünebilirlik	Çözünebilir değil
Kullanım alanları	Dekoratif objeler, modeller, saklama kutuları, oyuncaklar, son kullanıcı ürünleri, parça prototipleri, tıbbi implantlar
Avantajlar	- Kolay baskı, neredeyse tüm 3B yazıcılarda kullanılabilir - Düşük baskı sıcaklığı - 3B baskıya yeni başlayanlar için ideal - Baskı tablası malzemesine göre değişken olmakla beraber çoğu zaman tablanın ısıtılmasına gerek yoktur - Çevre dostu - Gıda güvenliği - Görsel olarak çekici, çok farklı renk seçenekleri - Biyoçözünür - Baskı esnasında zehirli gaz çıkışı yok
Dezavantajlar	- Neme ve suya karşı hassas - Nem emdiğinde kırılgan hale gelebilir ve baskı zorlaşır - 60 °C'de yumuşadığı için yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun değil - Baskı nozulunu tıkama eğilimi



Şekil 2.3. PLA filament ile yazdırılan kalibrasyon kübü.

2.3.2. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)

ABS günlük 3B baskılar için PLA'dan sonra kullanılan en popüler 3B yazıcı filamentidir. ABS orta düzeyde esnektir, yüksek gerilime, sıcaklığa ve darbeye dayanıklı özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin tümü ABS'yi genel amaçlı iyi bir 3B yazıcı filamenti yapar (All3dp, 2021; 3dinsider, 2021). ABS filamente ait özellikler Çizelge 2.5'te verilmiştir.

ABS filamentin yazdırılması PLA filamentin yazdırılmasından daha zordur. Ayrıca, tüm 3B yazıcılar bu filamenti işleyemez. ABS petrolden elde edilir ve biyolojik olarak parçalanamaz. Bu nedenle çevre dostu bir filament değildir (Martin, 2021).

Çizelge 2.5. ABS filamentin özellikleri (Allthat3d, 2021; All3dp, 2021; Martin, 2021; MatterHackers, 2021; 3dinsider, 2021).

Dayanım	Yüksek
Esneklik	Orta
Durabilite	Yüksek
Baskı zorluğu	Orta
Baskı sıcaklığı (°C)	210-250
Tabla sıcaklığı (°C)	80-110
Tabla yüzeyi	Kapton bant, saç spreyleri, BuildTak™
Büzülme/çarpılma	Yüksek
Çözünebilirlik	Esterlerde, ketonlarda ve asetonda
Kullanım alanları	Fonksiyonel parçalar, tüketim malları
Avantajlar	- Dayanıklı - Esnek ve hafif - 3B yazıcılarda kullanılabilecek en ucuz termoplastik
Dezavantajlar	- Petrol bazlı ve biyolojik olarak parçalanamaz - Yüksek ergime sıcaklığına sahip - Yazdırma sırasında rahatsız edici duman oluşumu

ABS, sağlam ve hareketli parçalar basmak için en çok önerilen filamenttir. Yüksek sıcaklıklara dayanması gereken parçalar yapmak için kullanılır (MatterHackers, 2021). Genellikle ev kullanıcıları tarafından 3B baskıda tercih edilen PLA ve ABS cinsi filamentlerin özellikleri Çizelge 2.6'da detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.6. PLA ve ABS cinsi filamentlerin özelliklerinin karşılaştırılması (Allthat3d, 2021; All3dp, 2021; Martin, 2021; MatterHackers, 2021; 3dinsider, 2021).

	PLA	**ABS**
Çekme Mukavemeti (MPa)	65	41
Kopma Uzaması (%)	7.5	8.2
Eğilme Mukavemeti (MPa)	97	63
Eğilme Modülü (MPa)	3600	2200
Erime Akış İndeksi (MVI)	10.3 cm^3/10 dk.	9.7 cm^3/10 dk.
Kırılganlık Sıcaklığı	60-65 °C	105 °C
Gevşeme Sıcaklığı	70-80 °C	110-125 °C
Erime Sıcaklığı	160-190 °C	210-240 °C
Baskı Sıcaklığı	180-230 °C	210-250 °C
Tabla Sıcaklığı	20-60 °C	80-110 °C
Dayanım	Orta	Yüksek
Esneklik	Düşük	Orta
Durabilite	Orta	Yüksek
Baskı Zorluğu	Kolay	Orta
Tabla Yüzeyi	Cam, mavi maskeleme bantı, PEI, yapıştırıcı, saç spreyi	Kapton bant, saç spreyleri, BuildTak™
Büzülme/çarpılma	Düşük	Yüksek
Çözünebilirlik	Çözünebilir değil	Esterlerde, ketonlarda ve asetonda
Baskı esnasında koku oluşumu	Var (şekerimsi, baharatımsı)	Var (plastik)
Baskı esnasında oluşan kokunun sağlığa zararı	Yok	Var
Doğada çözünme	Evet	Hayır
Geri dönüşüm	Evet	Evet
Kullanım alanları	Dekoratif objeler, modeller, saklama kutuları, oyuncaklar, son kullanıcı ürünleri, parça prototipleri, tıbbi implantlar	Fonksiyonel parçalar, tüketim malları
Avantajlar	- Kolay baskı, neredeyse tüm 3B yazıcılarda kullanılabilir - Düşük baskı sıcaklığı - 3B baskıya yeni başlayanlar için ideal	- Dayanıklı - Esnek ve hafif - 3B yazıcılarda kullanılabilecek en ucuz termoplastik

	- Baskı tablası malzemesine göre değişken olmakla beraber çoğu zaman tablanın ısıtılmasına gerek yoktur - Çevre dostu - Gıda güvenliği - Görsel olarak çekici, çok farklı renk seçenekleri - Biyoçözünür - Baskı esnasında zehirli gaz çıkışı yok	
Dezavantajlar	- Neme ve suya karşı hassas - Nem emdiğinde kırılgan hale gelebilir ve baskı zorlaşır - 60 °C'de yumuşadığı için yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun değil - Baskı nozulunu tıkama eğilimi	- Petrol bazlı ve biyolojik olarak parçalanamaz - Yüksek ergime sıcaklığına sahip - Yazdırma sırasında rahatsız edici duman oluşumu

PLA ve ABS filamentlerin haricinde 3B yazıcılarda kullanılan çok çeşitli filamentler mevcuttur. Bunlardan en çok bilinenleri ve kullanılanları; polietilen tereftalat glikol (PETG), termoplastik poliüretan (TPU), poliamid (Nylon), polikarbonat (PC), ahşap dolgulu, metal dolgulu, biyobozunur, karbon fiber, yüksek etkili polistiren (HIPS) ve polivinil alkol (PVA)'dır. Bu filamentler genellikle özel amaçlı baskılar için kullanılmaktadır. PLA ve ABS filamentler ile karşılaştırıldıklarında, yazdırma işlemleri daha zordur ve maliyetleri yüksektir. Ev kullanıcıları tarafından çok fazla tercih edilmemektedirler.

2.4. 3 Boyutlu Yazıcılar

1980'lerde eklemeli üretim denen yeni bir endüstriyel üretim yöntemi önerilmiştir. Buna göre 3B nesneleri gereksiz malzeme dolu bir bloktan çıkarmak (talaşlı imalat) yerine, nesne yoktan başlanarak ve malzeme katmanlar halinde eklenerek üretilir. Bu üretim şekli, mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılan benzer bir teknolojiye atıfta bulunarak 3B baskı olarak adlandırılmıştır (Çava, 2019).

3B baskı veya eklemeli üretim (AM) teknolojileri Uluslararası Standart Organizasyonun'da (ISO)/Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) 52900:2015 standartında "eksiltici üretim ve biçimlendirici üretim metodolojilerinin aksine, genellikle katman katman olmak üzere 3B model verilerinden parçalar yapmak için malzemelerin birleştirilmesi süreci" olarak tanımlanır. Bu teknoloji fiziksel parça oluşturulana kadar art arda malzeme katmanı ekleyerek bilgisayar destekli tasarım (CAD) modellerinden üç boyutlu parçalar oluşturur (Formlabs, 2021; Syed vd., 2017).

Çizelge 2.7. Eklemeli imalat yöntemlerinin ASTM standartına göre sınıflandırılması (Lee, An & Chua, 2017).

AM Prosesleri	**Alt Teknolojiler**
Bağlayıcı Püskürtme	Voxeljet ExOne Renkli Hızlı Yazdırma (CJP)
Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme	Lazerle Tasarlanmış Net Şekillendirme (LENS)
Malzeme Ekstrüzyonu	Eriyik Yığma Yöntemi (FDM)
Malzeme Püskürtme	Stratasys' Polyjet 3B Sistem Çoklu Yazdırma Solidspace
Toz Yatağı Füzyonu	Seçici Laze Sinterleme (SLS) Seçici Lazer Ergitme (SLM) Elektron Işını Ergitme (EBM)
Levha Laminasyonu	Lamine Obje İmalatı (LOM) MCor'un A4 Kağıt Yazdırma Kira'nın Kağıt Lamine Teknolojisi (PLT)
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi Aparatı (SLA) Dijital Işık İşleme (DLP)

Eklemeli üretim, basit fiziksel modellerden işlevsel testler için kullanılan parçalara kadar uzanan bir dizi prototip için uygun olabilir. 3B baskı, karmaşık geometrik şekillerin oluşturulmasını ve seçilen fonksiyonel bileşenlerin herhangi bir

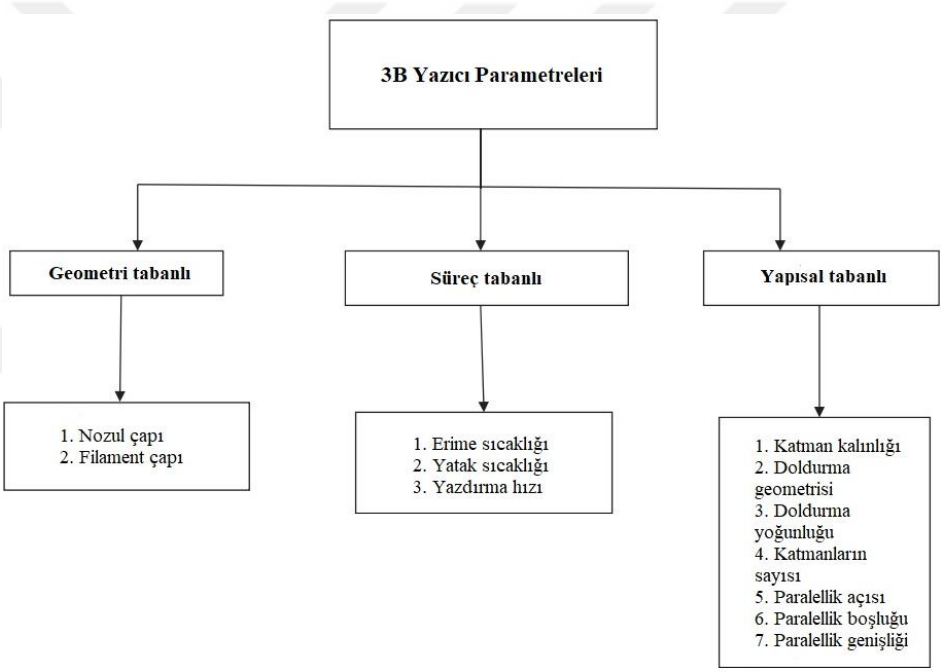
konfigürasyonda birleştirilmesini sağlar; böylece optik, kimyasal, elektronik, elektromanyetik, akışkan, termal ve akustik özellikleri potansiyel olarak birleştirebilen çok işlevli son kullanım cihazlarının üretimi için yeni bir yaklaşım sağlar (Yuanyuan vd., 2017). Standarda bağlı olarak, eklemeli imalat yöntemleri yedi kategoride sınıflandırılabilir (Çizelge 2.7).

Çizelge 2.8. 3B yazıcı çeşitlerinin genel özellikleri (Quanjin vd., 2020).

Yöntemler	**Hal**	**Katman yazdırma**	**Ana özellikler**	**Malzemeler**
FDM	Katı	Katı malzemenin biriktirilmesi	Düşük maliyet, temiz yüzey	Termoplastikler (PLA, ABS, PU), kompozitler
SLS	Toz	Toz katmanı	Yumuşak parçacıklar, sinterleme	Metaller ve alaşımları, seramikler, polimerler (PP), kompozitler
SLM	Toz	Metal toz katmanı	Tamamen erime	Metaller ve alaşımları, seramikler, kompozitler
SLA	Sıvı	Sıvı katmanın kürlenmesi	Ultraviyole kürleme, yüksek çözünürlük	Polimerler, seramikler, kompozitler
DLP	Sıvı	Sıvı katmanın kürlenmesi	Destek yapısı yok, yüksek hız	Elastomerler, meta malzemeler
DIW	Sıvı	Akışkan katmanın kürlenmesi	Kendinden destekli, tiksotropik mürekkep	Polimerler, seramikler, balmumları, polielektrolitler, kompozitler
Inkjet	Sıvı	Sıvı katmanın katılaştırılması	Çoklu yazdırma yetenekleri, karmaşık yapılar, yüksek çözünürlük	Werowhite, max, visijet M3, kristal, MED620, MED625FLX

Bu yedi sınıflandırma haricinde bu yöntemleri kullanan çeşitli 3B yazıcılar vardır. Bu yazıcılar parçaları katman katman oluşturan çeşitli üretim teknolojilerini kapsar. Her biri plastik ve metal parçaları oluşturma biçimlerine göre farklılık gösterir ve malzeme seçimi, yüzey kalitesi, dayanıklılık ve üretim hızı ve maliyeti açısından farklılık gösterebilir (Çizelge 2.8).

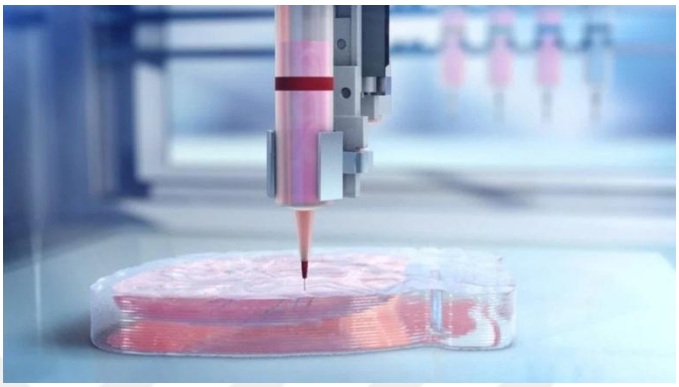
Uygulama için doğru 3B baskı sürecini seçmek, her teknolojinin avantajlarını ve sınırlamalarını uygulamanın en önemli gereksinimleriyle uyumlu hale getirmekten geçer (Ahart, 2019). Üretim için seçilen 3B yazıcının çeşitli yazdırma parametrelerinin yapılan işe uygun olarak ayarlanması da elde edilen ürünlerin yüzey kalitesi ve dayanımı üzerinde büyük öneme sahiptir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. 3B yazıcı parametrelerinin sınıflandırılması (Prabhakar vd., 2020).

3B baskı teknolojisi, yenilikçi ve çok yönlü bir teknoloji aşaması olarak ortaya çıkmıştır. Yeni fırsatlar açmış ve üretim verimliliğini artırmak isteyen şirketler için umut vermektedir. 3B baskı teknolojileri 1980'lerden beri var olsa da, makine, malzeme ve yazılımdaki son gelişmeler, 3B baskıyı daha geniş bir işletme yelpazesi için erişilebilir hale getirerek, önceden birkaç yüksek teknoloji endüstrisi ile sınırlı olan araçları daha fazla şirketin kullanmasını sağlamıştır. Günümüzde profesyonel, düşük maliyetli masaüstü ve tezgahüstü 3B yazıcılar inovasyonu hızlandırmakta ve mühendislik, imalat, diş hekimliği, sağlık (Şekil 2.5), eğitim, eğlence, mücevher ve

odyoloji gibi çeşitli sektörlerdeki işletmeleri desteklemektedir. Termoplastikler, seramikler, grafen bazlı malzemeler ve metal 3B baskı teknolojisinde baskı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Low vd., 2017). Günümüzde bir masaüstü 3B yazıcının maliyeti hemen hemen herkes tarafından karşılanabilir seviyededir (Savini & Savini, 2015).



Şekil 2.5. 3B biyobaskı (Mashambanhaka, 2018).

2.4.1. 3B Yazıcılarda Kullanılan Baskı Teknolojileri

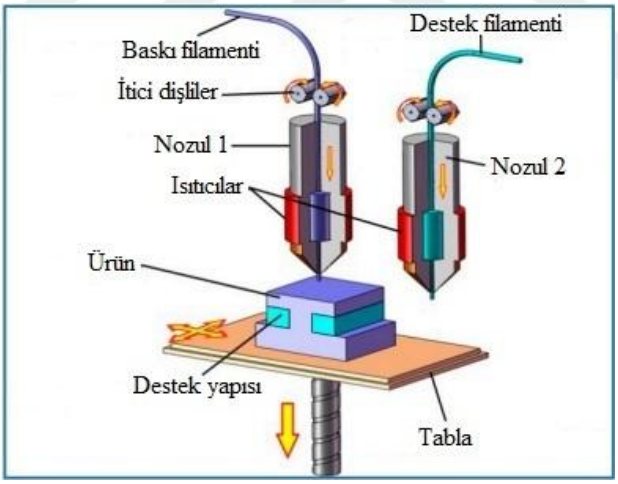
2.4.1.1. Eriyik Yığma Yöntemi (FDM)

Eriyik yığma yöntemi literatürde Fused Deposition Modeling (FDM) olarak isimlendirilmektedir. 3B yazıcılarda kullanılan baskı teknolojileri arasında FDM teknolojisinin kullanımı oldukça yaygındır. Filamenti ekstrüde eden cihazlar dünyadaki en ucuz ve en yaygın 3B baskı teknolojisi türleridir (Uzun & Erdoğdu, 2020).

Bu yazdırma teknolojisi kısmen; (i) FDM baskı platformunun basitliği, (ii) düşük maliyetli ve az bakım gerektiren FDM yazıcıların mevcudiyeti, (iii) çok çeşitli FDM yazdırılabilir malzemelerin yaygınlaşmasından dolayı son zamanlarda büyük bir ilgi görmüştür (Kumar vd., 2020).

FDM yazdırma işlemi başlamadan önce, kullanıcının özel bir yazılım kullanarak 3B CAD verilerini (3B model) birden çok katmana ayırması gerekir. 3B yazıcıya bağlı bilgisayarda çalışan dilimleme yazılımı, bir nesnenin ölçülerini X, Y, Z koordinatlarına çevirir (STL dosya uzantısı), baskı sırasında nozulun ve tablanın hesaplanan rotayı takip etmesini kontrol eder. Dilimlenmiş CAD verileri daha sonra yapı platformunda bir seferde nesne katmanını oluşturan yazıcıya gider (3dinsider, 2020).

Çalışma şekli, 3B yazıcıya bir filament makarasının takılması ve filamentin ekstrüzyon başlığındaki bir yazıcı nozuluna beslenmesidir. Yazıcı, nozulu ayarlanan sıcaklığa kadar ısıtır, bir step motor filamenti ısıtılmış nozula iter ve filamentin erimesine neden olur. Nozul parça kenarlarını izleyen X-Y çizici tipi bir mekanizmaya monte edilmiştir ve destek malzemesi için (model malzemesinden farklı) ikinci bir ekstrüzyon nozulu vardır. Nozul, gerekli geometride tabla üzerinde hareket ettirildiğinde, her tabakayı oluşturmak için ince bir ekstrüde plastik biriktirir. Plastik nozuldan çıktıktan hemen sonra sertleşir ve alttaki katmana yapışır. Nesne parça oluşturulurken dikey olarak aşağı katman katman hareket eden mekanik bir tabla üzerine inşa edilir. Bir katmanın yazdırılması bittiğinde, yazıcı diğer bir katmanı yazdırmaya devam eder. Bu enine kesitleri yazdırma işlemi 3B nesne tamamen oluşana kadar her katmanda tekrarlanır (Şekil 2.6). Oluşturulacak nesnenin şekline bağlı olarak bazen yazdırılan nesneye destek yapıları eklemek gerekir. Destek yapıları, sarkan geometriler için otomatik olarak oluşturulur ve daha sonra bunlar nesneden ayrılarak kaldırılır (All3dp, 2021; Patel & Kadia, 2014).



Şekil 2.6. FDM yazdırma teknolojisi çalışma prensibi (Yuanyuan vd., 2017).

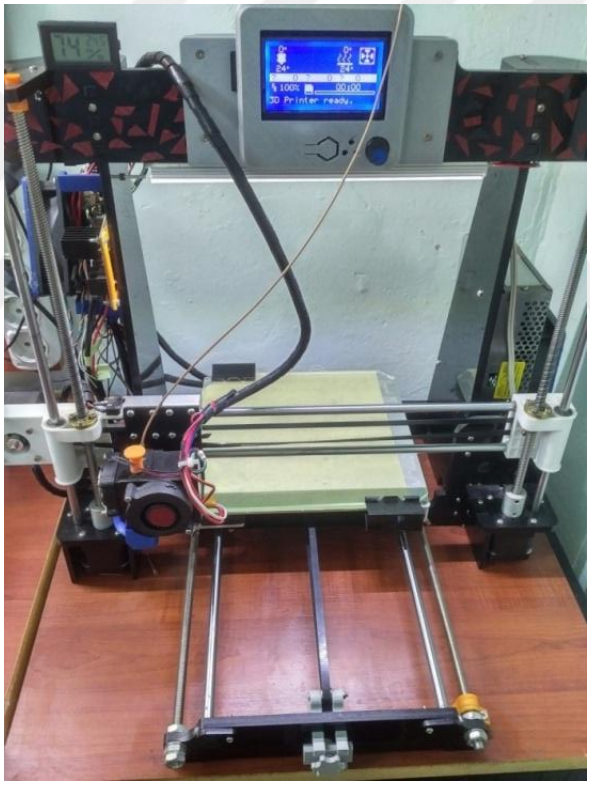
Diğer birçok 3B teknoloji gibi bitmiş ürünün temizlenmesi gerekir. Ham FDM parçalarının yüzeylerinde bazen görünür katman çizgileri olabilir. Bunların düzeltilmesi baskıdan sonra elle zımparalamayla olabilir. Düz ve pürüzsüz bir yüzeye sahip son ürün elde etmenin tek yolu budur (3dinsider, 2020).

FDM 3B yazıcılar modellerin temel hallerinin yanı sıra daha sonra işlenebilecek parçalar gibi basit parçaların düşük maliyetli ve hızlı prototiplenmesi için çok uygun bir yöntemdir. Ancak FDM, SLS veya SLA ile karşılaştırıldığında düşük çözünürlük ve

doğruluğa sahiptir; karmaşık şekilli parçaları yazdırmak için en iyi yöntem değildir. Kimyasal ve mekanik cilalama işlemleri ile daha kaliteli yüzeyler elde edilebilir (Formlabs, 2021).

FDM son kullanıcı düzeyinde en yaygın kullanılan 3B baskı teknolojisidir (Şekil 2.7). FDM'nin yardımıyla sadece operasyonel prototipleri değil, aynı zamanda lego, plastik dişliler ve çok daha fazlası gibi kullanıma hazır ürünleri de yazdırabilirsiniz.

FDM ile üretilmiş ürünler hem işlevseldir hem de dayanıklıdır. Bu nedenle BMW, Nestle ve tanınan birçok şirket FDM 3B baskı teknolojisini kullanmaktadır (3dinsider, 2020).



Şekil 2.7. FDM teknolojili ev tipi bir 3B yazıcı.

FDM baskı teknolojisinde;

- Baskı süresi, modelin boyutlarına ve şeklin karmaşıklığına bağlıdır.
- Küçük nesneler kısa sürelerde tamamlanabilirken, daha büyük, daha karmaşık şekilli parçaların yazdırılması daha uzun zaman alır.
- SLA ile karşılaştırıldığında FDM teknolojisi daha yavaş baskı hızına sahiptir.

- Daha sonra nesneler boyanabilir, kaplanabilir ve hatta dövülebilir.
- FDM teknolojisi günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve otomobil, gıda ve oyuncak üretimi gibi sektörlerde kullanılmaktadır.
- FDM, yeni ürün geliştirme, prototip oluşturma ve hatta son ürün imalatında kullanılır. Bu teknoloji, çevre dostu ve kullanımı kolay olarak kabul edilir. Bu 3B baskı yönteminin kullanılmasıyla ve sürekli gelişmesiyle karmaşık şekillere ve boşluklara sahip parçalar yazdırmak mümkün hale gelmiştir.
- Bu teknoloji ile basılan parçalar, mükemmel mekanik mukavemete ve ısı direncine sahip olup, basılı modelleri işlevsel prototipler olarak kullanmanıza olanak tanır.
- İşlevsel prototipler, konsept modeller ve üretim yardımcıları üretmek için popülerdir. Doğru ayrıntılar oluşturabilen ve olağanüstü bir güç-ağırlık oranına sahip bir teknolojidir.
- Endüstriyel FDM 3B yazıcılar baskı için daha geniş bir mühendislik termoplastik çeşidi sunarlar ancak aynı zamanda yüksek bir fiyata sahiptirler (Snikhovska, 2020).

FDM baskı teknolojisinde baskı malzemesi olarak termoplastik filamentler (PLA, ABS, PET, PETG, TPU, HIPS, Nylon, PCABS, ULTRAT, Karbon Fiber) kullanılır (All3dp, 2021). Bununla birlikte bir polimerin FDM yazıcı ile kullanıma uygun olması için erime sıcaklığının oldukça düşük olması ve hızlı soğutma yoluyla faz dönüşümü yapabilmesi gerekir (Spinelli vd., 2018). FDM teknolojisinin boyutsal doğruluğu ±0.5% (alt limit ±0.5 mm) dir; genel uygulama alanları elektrik muhafazaları, form ve uygunluk testleri, jigler ve fikstürler, döküm modelleri; güçlü yönleri iyi yüzey kalitesi, tam renkli ve çoklu malzeme kullanımının mümkün olması; zayıf yönleri ise üretilen parçaların kırılgan olması, mekanik parçalar için uzun kullanım ömrünün olmaması, görsel amaçlar için SLA/DLP baskı yöntemlerinden daha yüksek maliyetli olmasıdır (All3dp, 2021).

Yapılan bu tez çalışmasında da yazdırma için FDM baskı teknolojisi kullanan Creality marka CR-10 S4 tipi yazıcı kullanılmıştır. Yazıcıya ait teknik özellikler Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Creality marka CR-10 S4 tipi yazıcının teknik özellikleri.

Markası	Creality
Modeli	CR-10 S4
Baskı Teknolojisi	FDM (Fused Deposition Molding)
Baskı Hacmi	400x400x400 (mm)
Baskı Hızı	Standart 60 mm/s, Maksimum 100 mm/s
X-Y Eksen Hassasiyeti	±0.1 mm
Katman Yüksekliği	0.1-0.4 mm
Nozul Sayısı	1
Nozul Çapı	0.4 mm
Filament Çapı	1.75 mm
Tabla Sıcaklığı	≤60 °C
Baskı Sıcaklığı	≤250 °C
Baskı Platformu	Cam Tabla
Yazdırma Yazılımı	Cura, Repetier-Host, Simplify3D
Desteklenen Dosya Biçimleri	.stl, .obj, .amf, g-code
Kullanılabilir Filamentler	PLA, ABS, Wood, TPU, PLA kompozitler, Copper, Carbon Fiber
3. Parti Filament Desteği	Var
Bağlantı	CD Kart, USB Kablo
Uyumlu İşletim Sistemleri	Windows (XP, Vista, 8, 8.1, 10)/Linux
Güç Kaynağı	AC Giriş 110-240 V, DC Çıkış 12V
Güç	270 W
Filament Sensörü	Var
Elektrik Kesintisi Sonrası Yazdırma İşlevini Sürdürme	Var
Cihaz Ağırlığı	11.5 kg
Cihaz Boyutu	600x680x615 mm

FDM baskı teknolojisi dışında farklı baskı teknolojileri kullanan yazıcılar da mevcuttur. Bu baskı teknolojilerinden bazıları; seçici lazer sinterleme (SLS), stereolitografi (SLA), dijital ışıkla işleme (DLP), doğrudan mürekkep yazdırma (DIW) ve bağlayıcı püskürtme (3DP)'dir. Bu yöntemlerden birkaçının kaliteleri çok iyidir. Fakat maliyetlerinin çok yüksek olmaları, yazdırma için kullanılan hammaddelere

erişmedeki zorluklar veya kısıtlı seneçekler yaygın bir şekilde kullanılmalarının önündeki en büyük engeldir. Oysa FDM teknolojili yazıcılar ev kullanıcılarının erişebilecekleri fiyatta, değişik markalarda ve çeşitli özelliklerde bulunabilir. Ayrıca baskıda kullanılan değişik özelliklere sahip, düşük maliyetli ve kolay erişilebilir filamentler bu tip yazıcıların ev kullanıcıları arasında popüler olmasını sağlamıştır.

2.4.2. 3B Yazıcı Genel Parçaları

3B yazıcılar çok farklı parçalara sahip olmalarına rağmen tüm yazıcılarda genel olarak bulunan bazı parçalar vardır. Bu parçalar Şekil 2.8'de gösterilmiştir ve numaralandırılarak açıklanmıştır.



Şekil 2.8. Üç boyutlu yazıcının genel parçaları (3dprinteruniverse, 2021).

1. **X ekseni:** Baskı kafasının sola ve sağa doğru hareketleri X ekseni boyunca olur. Baskı kafası genellikle X ekseni boyunca hareket eder.
    a. **X ekseni motoru:** Baskı kafasının X ekseninde hareket etmesini sağlar ve kontrol kartı tarafından yönetilir.

2. **Y ekseni:** Öne ve arkaya doğru hareketler Y ekseni boyunca olur. Baskı yatağı genellikle Y ekseni boyunca hareket eder.
    a. **Y ekseni motoru:** Baskı yatağının Y ekseninde hareket etmesini sağlar ve kontrol kartı tarafından yönetilir.
3. **Z ekseni:** Yukarı ve aşağı hareketler Z ekseni boyunca olur. Yazıcının markasına ve modeline göre baskı kafası veya baskı yatağı Z ekseni boyunca hareket edebilir.
    a. **Z ekseni motoru:** Baskı kafasının veya baskı yatağının Z ekseninde hareket etmesini sağlar ve kontrol kartı tarafından yönetilir.
4. **Baskı yatağı:** Baskının oluşturulduğu yüzeydir. Baskı yatakları metalden yapılır ve alt yüzeyinde yatak sıcaklığının kontrol kartı tarafından istenen sıcaklığa ayarlanması sağlayan rezistansa sahiptir. Baskı yatağının yüzeyi baskının yatağa yapışmasına yardımcı olan ve baskı işleminin bitmesi sonrası parçanın yataktan rahat çıkarılmasını sağlayan çeşitli malzemelerden yapılabilir veya manyetik özelliği sayesinde kolayca çıkarılabilen baskı yatağı yüzeyine sahip olabilir.
5. **Denetleyici (Kontrol kartı):** Bu kısım üç boyutlu yazıcının beynidir. Genellikle yazıcıyı kontrol etmek için gerekli arabirimin olduğu ve diğer tüm parçaların kontrollerinin bağlı olduğu yerdir. Kontrol kartı üzerinde çeşitli bilgileri görmemizi sağlayan bir ekran ve çeşitli seçimleri yapabilmemizi sağlayan kontrol tuşları bulunabilir.
6. **Ekstrüder:** Filamentin baskı için nozula iletilmesini sağlar. İçerisinde bir ekstrüder motoru ve kontrol kartından gelen komuta göre filamenti yavaşça iten dişli bir sistem vardır. Farklı filamentler için farklı özelliklere sahip birçok ekstrüder çeşidi vardır. Ekstrüderler bowden tipi (uzaktan) veya direkt hotend üzerinde doğrudan tahrikli olabilir.
    a. **Ekstrüder motoru:** Filamenti ileri veya geri hareket ettirerek istenen hızda nozula iletilmesini sağlar.
7. **Bowden borusu (Teflon boru):** Bowden tarzı ekstrüderli yazıcılarda filamentin nozula iletilmesini sağlayan ısıya dayanıklı borudur.
8. **Hotend (Sıcak uç):** Hotend düzeneği filamentin eritildiği ve böylece baskının oluşturulmasını sağlayan kısımdır. Hotend birkaç bölümden oluşur:

a. **Nozul:** Isıtılarak filamentin eritildiği kısımdır. Nozul ısıtıcı bloğuna bağlanmıştır. Alınan baskının hassasiyetine bağlı olarak 0.1 mm'den 2 mm'ye kadar çeşitli çıkış ucu çapları vardır. En çok kullanılan nozul çapı 0.4 mm'dir. Nozul bağlantı kısmı dişli yapıya sahiptir ve gerektiğinde değiştirilebilir.

b. **Isıtıcı bloğu**: Isıtıcı fişeğin bağlı olduğu yerdir. Blok çevresinde yalıtım olabilir veya olmayabilir. Yalıtım, ısıtıcı bloğundaki ısı dalgalanmasını önlemeye yardımcı olur.

c. **Isıtıcı fişek:** Isıtıcı fişek filamentin erimesi için ısıtıcı bloğun ısısını arttıran parçadır.

d. **Termistör:** Isıtıcı bloğun hemen içine yerleştirilmiştir ve hotendin sıcaklığını ölçer. Kontrol kartı kullanıcı tarafından ayarlanan ve ölçülen sıcaklık değerine bağlı olarak ısıtıcı fişeğin çalışmasını kontrol eder.

e. **Isı dağıtıcı:** Isıtıcı bloğundan gelen ısının hotendten çok uzağa gitmesini önlemek için kullanılan kısımdır. İdeal olarak ısı, filamentin eridiği bölgede izole edilmelidir. Filamentin sıcak uçta çok fazla yumuşaması filamentin nozuldan itilememesine ve bundan dolayı tıkanmaya neden olur.

f. **Soğutma fanı:** Isı dağıtıcısını soğutarak filamentin daha etkin soğutulmasını sağlar.

g. **Parça soğutma fanı:** Nozuldan çıkan malzemeyi hızla soğutur böylece yazdırılan katmanın boyutlarının değişmesini ve geometrik şekil bozukluğunun engellenmesini sağlar. Tüm yazıcılar buna sahip değildir ve her zaman gerekli değildir. Gereksinim, kullanılan malzemeye bağlıdır.

9. **Limit anahtarları (Son duraklar):** Her eksenin başlangıç konumunu işaretlerler. Yazdırma kafası 0,0,0 koordinatlarına gönderildiğinde (eksenleri ana konumlarına hareket ettirerek), her eksen bu son duraklara(limit anahtarlarına) doğru hareket edecektir. Baskı kafası ve baskı yatağı limit anahtarlarına ulaşıp anahtarları kapattığında o eksenin hareketi duracaktır. Bu, yazıcıya baskı kafasının ve baskı yatağının X,Y,Z ekseninde başlangıç konumuna ulaştığını bildirir.

10. **Ekstra parçalar:** Bu parçalar tüm yazıcılar için gerekli değildir ancak yazıcıların kullanımlarını kolaylaştırdıkları için giderek daha yaygın hale gelmektedirler.
    a. **Otomatik seviye sensörü:** Otomatik seviye sensörleri tamamen isteğe bağlıdır ve birçok farklı formda olabilirler. Bu sensör yazıcının farklılıkları telafi edebilmesi için yataktaki alçak ve yüksek noktaların nerede olduğunu ölçmek için kullanılır. Bu baskı yatağının düz olmasa bile yazıcının yüzeye eşit şekilde yazdırmasını sağlayabilir veya kullanıcının baskı yatağının manuel kalibrasyonunu daha doğru ve kolay yapmasını sağlar.
    b. **Filament sensörü:** Bu ünite filamentin bittiğini algılar ve baskıyı duraklatır. Yeni bir filament takılarak baskı kaldığı yerden devam ettirilebilir.

2.4.3. 3B Yazıcıların Kullanım Alanları

Eğitim: Gün geçtikçe birçok okul müfredatına 3B baskı yöntemlerini dahil etmektedir. 3B baskının eğitim için faydası öğrencilerin pahalı araçlara ihtiyaç duymadan prototipler oluşturmasına olanak tanımasıdır. Bu sayede öğrenciler, gerçekte tutabilecekleri modelleri tasarlayarak ve üreterek 3B baskı uygulamaları hakkında bilgi sahibi olurlar. 3B baskı fikirler ve ekrandaki tasarımlar arasındaki boşluğu doldurarak, bu fikirlerin/tasarımların fiziksel şekilde 3 boyutlu dünyada oluşturulmasına olanak tanır. Bu sayede grafik tasarım öğrencileri karmaşık çalışma parçalarına sahip modelleri kolayca oluşturabilir, fen bilimleri öğrencileri diğer biyolojik örneklerin yanı sıra insan vücudundaki organların enine kesitlerini oluşturabilir ve inceleyebilir, kimya öğrencileri ise moleküllerin 3 boyutlu modellerini yapabilirler (Makerbot, 2021).

İnşaat: İnşaat sektöründe 3B baskı, binaları veya inşaat bileşenlerini üretmenin ana yolu olarak çeşitli teknolojiler sunar. İnşaat alanında 3B baskı ticari, özel, kamu ve endüstriyel sektörlerde çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Bu teknolojilerin avantajları arasında daha çok karmaşık yapıların oluşturulabilmesi, yüksek doğruluk, daha hızlı inşaat, daha az işçilik maliyetleri, daha çok işlevsel entegrasyon ve daha düşük atık bulunmaktadır. Beton 3B baskı, binaların ve diğer yapıların inşa edilebilmesinin daha ucuz ve hızlı bir yöntemi olarak 1990'lardan beri geliştirilmektedir. Beton basmak için özel olarak tasarlanmış büyük ölçekli 3B yazıcılar, inşaat temellerini

oluşturabilir ve duvarlar inşa edebilir. 3B baskı ile tamamen tamamlanmış ilk konut binası Rusya'nın Yaroslavl kentinde 2017 yılında inşa edilmiştir (Makerbot, 2021).

Tıp: Son yıllarda tıp dünyasında ameliyat hazırlığından protezlere kadar pek çok 3B biyobaskı uygulaması olmuştur. 3B baskılı protezler, 3B baskının çok yönlülüğünün yararlı bir uygulamasıdır. Hasta üzerinde ölçülen protezler kişiye özel modellenebilir ve çok düşük fiyatlara 3B olarak basılabilir. 3B baskı odaklı tedavilerin cerrahi kullanımları, kemik rekonstrüktif cerrahi planlaması için anatomik modelleme ile 1990'ların ortalarından beri kullanılmaktadır. Gelecekte biyobaskı veya 3B baskılı hücreler ve dokular ile ihtiyacı olan hastalar için kemik ve organlar 3B olarak basılabilecektir (Ooi, 2019).

Yiyecek: Gıdaların katman katman basılarak üç boyutlu nesneler haline getirilmesiyle eklemeli gıda üretimi gerçekleştirilmektedir. NASA gıda israfını azaltmak ve bir astronotun gıda ihtiyaçlarını karşılıyacak şekilde tasarlanmış yiyecekler yapmak için 3B baskı ile üretilmiş yiyecekler teknolojisini araştırmaktadır (Nasa, 2013).

Tekstil: 3B baskı teknolojisi giyim dünyasına 3B baskılı bikiniler, ayakkabılar ve elbiseler deneyen moda tasarımcılarıyla girmiştir. Ticari üretimde Nike 2012 Vapor Laser Talon futbol ayakkabısını prototiplemek ve üretmek için 3B baskı kullanmış ve New Balance firması da sporcular için özel olarak tasarlanmış 3B ayakkabılar üretmektedir (Fitzgerald, 2013).

Endüstriyel sanat ve mücevherat: 3B baskı takı ve mücevher yapmak için kalıplar ve hatta takıların kendisini üretmek için kullanılır. 3B baskı metal veya plastik sanatsal ürünlerde, oyuncak bebek modellerinde ve özelleştirilebilir hediyelik eşya endüstrisinde hızla popüler hale gelmektedir (Envisiontec, 2021).

Bilgisayarlar: 3B baskı masaüstü veya taşınabilir bilgisayarların kasalarını, klavye ve fare gibi çeşitli ekipmanları üretmek için kullanılmaktadır.

Çevresel kullanım: Mercan poliplerini kolonize etmeye ve hasarlı resifleri yeniden oluşturmaya teşvik eden özel mercan şekilli yapılar oluşturmak için kumtaşı benzeri bir malzeme kullanan büyük ölçekli 3B baskı kullanılmaktadır. 3B yazıcı ile üretilmiş yapay resifler kullanılan diğer yapılardan ziyade doğal bir şekle ve kimyasal uyuma sahiptir (Link, 2019).

Evsel kullanım: Evlerde kullanılan hobi amaçlı 3B yazıcılar ile kullanıcılar çalışan sistemler, saatler, sanatsal objeler ve kendi tasarımlarına ait birçok nesneyi basabilmektedir. Kullanıcılar sahip oldukları 3B yazıcı ile farklı 3B yazıcıların veya kendi 3B yazıcılarının parçalarını üretebilmektedir.

Dişçilik: Diş hekimleri için 3B yazıcılarla üstün uyum ve tekrarlanabilir sonuçlar ile düşük birim maliyetlerde yüksek kalitede özel ürün ve cihazlar üretebilir. 3B yazıcılar ile diş hekimlerinin kullandığı taç ve köprü modelleri, şeffaf hizalayıcı ve Hawley tutucu modelleri, cerrahi kılavuzlar, döküm ve presleme kalıpları ile takma dişler üretilebilir (Formlabs, 2021).

Otomotiv endüstrisi: 3B baskı teknolojisi otomotiv endüstrisinde daha kısa üretim süreleri ve azaltılmış maliyetler ile daha hafif, daha güvenli ve çevre dostu arabalar üretilmesinin kapılarını açmıştır. Otomobil tasarımında temel amaç, güvenliği sağlarken otomobilin ağırlığını en aza indirmektir. Eklemeli imalat teknikleri kullanılarak, parçalardaki petek hücresi veya boşluklar gibi karmaşık kesit alanlarının üretimi mümkün kılınmıştır. 3B yazıcılar eski araçlar için bulunması zor parçaların yeniden yapılmasında da kullanılır (Lim vd., 2016).

Uzay ve havacılık: 3B baskı teknolojisi uzay ve havacılık sanayinde de giderek artan bir kullanıma sahiptir. Havacılık endüstrisinde 3B baskı teknolojisi, gelişmiş ve karmaşık geometrili hafif parçalar yapma potansiyeline sahiptir. 3B baskı teknolojisi havacılık parçalarını üretmek için kullanılan malzeme miktarını ve böylece ağırlığı azaltabileceğinden uçaklarda yakıt tasarrufu sağlayabilir. 3B baskı teknolojisi, motorlar gibi bazı havacılık bileşenlerinin yedek parçalarını üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Shahrubudin, Lee & Ramlan, 2019). Airbus, A350 XWB modelinin 3B baskı ile üretilen 1000'den fazla bileşene sahip olduğunu duyurmuştur. 3B baskı çeşitli hava kuvvetleri tarafından uçakların yedek parçalarını basmak için de kullanılmaktadır. NASA mühendisleri Mars aracını oluşturan parçaların yaklaşık 70'ini doğrudan bilgisayar tasarımlarını kullanarak üretim sınıfı bir Stratasys 3B yazıcıda inşa etmişlerdir (Ramya & Vanapalli, 2016).

2.4.4. 3B Yazıcıların Avantajları

- Gerçek nesnenin küçük ölçekli bir versiyonu ile geleneksel yöntemlere göre daha kısa sürede üretim sağlar. Bu, tasarımcıların ürünün kalitesini etkileyebilecek herhangi bir tasarım kusuru varlığını araştırabilmelerine ve ürünlerini geliştirmelerine yardımcı olur.

- Pahalı ve uzun prototip işleme sürecinin aksine 3B yazıcılar ile her tasarım değişikliğinde ucuz ve hızlı bir şekilde yeni bir prototip oluşturulabilir.

- Bir 3B baskı tesisi kurmanın ilk maliyeti yüksektir fakat geleneksel üretim yöntemleri kullanıldığında oluşan işçilik ve üretim maliyetlerine nazaran bu maliyet çok daha düşüktür.

- 3B yazıcı teknolojisi ile ürünler gerektiğinde üretilebilmekte böylece fazla üretilen ürünler ortadan kalktığı için ürünlerin depolama maliyetleri azalmaktadır.

- 3B baskı teknolojisinin yaygın kullanımı bu yazıcıları tasarlamak ve üretmek için ihtiyaç duyulan mühendislere, sorun giderme ve bakım konusunda teknisyenlere olan talebi artırarak yeni iş imkanlarının artmasına neden olacaktır.

- 3B yazıcılardaki teknolojinin ilerlemesi ile özelleştirilebilir insan vücudu parçaları ve organları üretilebilecektir. Bu da yalnızca organ bağışçılarının eksikliğini gidermekle kalmayacak aynı zamanda oluşturulan organlar hastanın kendi DNA'sından oluşacağından vücudun organı reddetme olasılığını da ortadan kaldıracaktır.

- 3B yazıcılar belirli bir parçayı üretmek için gerekli malzemeyi kullandığından (sıfır veya çok az israf ile) toplam malzeme maliyetinin düşmesini sağlar.

- 3B baskı teknolojisinin kullanılması üretim sürecinde oluşan atık malzeme miktarını azaltır.

- 3B baskı, karmaşık şekillerin geleneksel üretim yöntemlerine nazaran çok daha hafif olarak üretilmesine olanak tanır.

- 3B yazıcılarda basılmış parçalar; su geçirmezlik, yüksek mukavemet ve ısı direnci gibi belirli özellikler sunan özelleştirilmiş malzemelerden üretilebilir.

- Geri dönüştürülmüş, geri dönüştürülebilir veya organik bitki bazlı malzemeler filament olarak kullanılabildiği için 3B yazıcılar ile üretilmiş ürünler çevre dostudur.

- 3B yazıcılar eklemeli bir üretim süreci kullandığı için bir parçanın üretimi esnasında geleneksel yöntemlerde (torna, freze, vb.) olduğu gibi kesim sonucu ortaya çıkan talaş yoktur. Bu sayede daha az ana malzeme kullanılır bu durum malzeme maliyetlerini azaltabilir.

- 3B yazıcılar ile üretilen parçalarda geleneksel üretime göre daha tutarlı parça ölçüleri oluşmakta ve üretim esnasında tüm parça katmanları takip edilerek üretim sıkı bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu da üretilen parçaların kalitesini arttırmaktadır.

- 3B baskı yöntemi ile geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan içi boş ve karmaşık şekilli parçaların üretimi mümkündür.

- 3B baskı yöntemi geleneksel üretim süreçlerinde ortaya çıkan tasarım kısıtlamalarını ortadan kaldırmıştır.

- Tek adımlı bir üretim süreci olarak 3B baskı, zamandan ve dolayısıyla üretim için farklı makinelerin kullanılmasıyla ilişkili maliyetlerden tasarruf sağlar.

- 3B yazıcıların kullanılması ile geleneksel yöntemlerle üretim yapılırken ihtiyaç duyulan çeşitli teçhizat, makine ve işçilik maliyetleri ortadan kalkar.

- Baskıda kullanılan filamentler çok çeşitli yapılarda ve uygun fiyatlar ile temin edilebilir.

- Özellikle baskıda kullanılan PLA filamenti sağlığa zararsızdır, eridiğinde çevreye ve sağlığa zararlı gazlar çıkarmaz ve doğada çözünebilir olması ile çevreye zarar vermez (Inktonerstore, 2021; Kroll & Artzi, 2011; Miller, 2021; Twi-global, 2021).

2.4.5. 3B Yazıcıların Dezavantajları

- 3B yazıcılar ile oluşturulan parçaların boyutu şu an için sınırlıdır. Ancak yakın gelecekte mimari yapılar gibi büyük öğeler 3B baskı kullanılarak oluşturulabilir.

- Geleneksel üretim yönteminde kullanılabilecek çok çeşitte ve sayıda hammadde vardır fakat şu anda 3B yazıcılar yüze yakın hammadde (plastik, metal, vb.) ile çalışabilmektedir.

- 3B baskıda baskı dosyasına sahip herkes ürünleri üretebilecektir; bu durum telif hakkı sahibini zora sokacaktır ve çok özel ürünler üreten şirketler zarar görebilecektir.

- Kullanımı tehlikeli olabilecek ürünler kontrolsüz biçimde üretilebilecektir.

- Özellikle FDM yöntemi kullanılarak üretilen parçaların belirli eksenlerde gelen kuvvetlere karşı dayanımları düşüktür.

- 3B yazıcı teknolojisinin endüstriyel alanlarda kullanımı için hala geliştirilmesi gerekmektedir.

- Büyük boyutlarda veya özel malzemeler (cam, metal) kullanarak baskı alabilen 3B yazıcılar günümüzde pahalıdır.

- Bazı basılan parçaların sonradan işlenmesi gerekebilir (destek bölgelerinin ve yüzeyin temizlenmesi).

- 3B baskı ile ilgili diğer bir potansiyel sorun ise kullanılan bazı yazıcıların daha düşük baskı toleranslarına sahip olmaları nedeniyle nihai parçaların orijinal tasarımdan farklı olabilmesidir. Bu baskı sonrası düzeltilebilir ancak bu da üretim süresini ve maliyetini arttıracaktır (Inktonerstore, 2021; Miller, 2021; Twi-global, 2021).

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde bulunan akademik çalışmalarda PLA ve kompozitlerinin farklı özellikleri çeşitli şartlar altında incelenmiştir. Araştırmacılar tarafından genellikle nem ve sıcaklık şartlandırma koşulları olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında numunelerin mekanik, baskı ve yüzey özellikleri gibi parametreler incelenmiştir. Bu parametreler incelenirken numunelere çekme deneyleri ve FTIR analizleri yapılmış, yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, SEM görüntüleri alınmıştır.

Harris & Lee (2010) yaptıkları çalışmada PLA'nın dayanıklılığını, birkaç haftalık bir süre boyunca yüksek sıcaklık ve nem koşullarına maruz bırakarak değerlendirmişlerdir. 50 °C'de ve %90 bağıl nemde, hem amorf hem de kristal PLA numuneleri önemli nem emilimi göstererek hidrolizin gerçekleşmesine izin verdiklerini tespit etmişlerdir. Numuneleri 1, 4, 8 ve 12 haftalık süreçlerde şartlandırılmış koşullara maruz bırakmışlardır. Şartlandırma ortamlarında kristal içeriğin %10.8'den %51'e yükseldiğini tespit etmişlerdir. Bu durumun, amorf malzemenin tercihli hidrolizinden, daha kısa zincirlerin artan kristalizasyonundan, nem ile plastikleşmeden kaynaklandığını belirtmişler ve bu sonuçların koşullandırma sırasında artan zincir hareketliliği anlamına geldiğini söylemişlerdir.

Zhang & Thomas (2011) yaptıkları araştırmada PLA/PHB biyopolimelerin (%25, %50, %75 ve %100) oranlarda karıştırarak biyobozunma, termal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları SEM görüntülemelerine göre, PHB'lerde düzensiz kırılmaların gözlendiğini, PLA'ların ise amorf bir polimerde görülen tipik yüzey kırılmalarına sahip olduklarını söylemişlerdir. PHB'lerde oluşan bu düzensiz kırılmaların ise kristalin yapısından dolayı kaynaklandığını savunmuşlardır.

Letcher & Waytashek (2014) yürüttükleri çalışmada ev tipi 3B yazıcı kullanarak bir ev kullanıcısının da alabileceği ticari PLA filament ile bastıkları numunelere çekme, eğilme ve yorulma testleri uygulamışlardır. Parça mukavemeti üzerindeki oryantasyon açısının etkilerini test etmek için numuneleri 0°, 45° ve 90° raster oryantasyon açılarında basmışlardır. Tüm numune boyutlarını ASTM D638 standardına uygun şekilde belirlemiş ve numuneleri %100 doluluk oranında basmışlardır. Çekme testi numunelerini oda sıcaklığında ve 5 mm/dk yer değiştirme hızında test etmişlerdir. PLA filamentlere de çekme testi uygulamışlardır. Deney esnasında kafalar arası mesafe 200 mm, çekme hızı 500 mm/dk, 200 mm/dk, 50 mm/dk, 5 mm/dk olacak şekilde deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Basılan numunelere yaptıkları çekme testi sonucunda 45° raster yönelimli numunelerin dayanımının en yüksek olduğunu bulmuşlardır. Yorulma testinde, 90° raster yönelimli numuneler yorulma yüklemelerine karşı en az dirençli iken 45° ve 0° raster yönelimli numunelerin yorulma ömürlerinin çok benzer olduğunu ve daha fazla araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca basılan numuneleri mikroskop yardımı ile incelemişler ve baskı sürecinde numunelerde oluşan boşluk boyutlarını belirlemişlerdir.

Sajna, Nayak & Mohanty (2016) araştırmalarında aşı kopolimer uyumlu PLA biyonanokompozitlerinin özellikleri üzerinde nem absorpsiyonunun ve hızlandırılmış hava koşullarının etkisini rapor etmişlerdir. Numuneleri oda sıcaklığında destile su banyosuna daldırarak 30 gün süreyle nem emme testleri yapmışlar ve her zaman aralığında emilen nem miktarını ölçmüşlerdir. C30B nanokil ve aşı kopolimerinin fiber takviyeli PLA kompozitlerine eklenmesiyle nem alma oranının azaldığını belirtmişlerdir. Nem emiliminin kompozitlerin mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikleri çekme ve darbe testleri kullanılarak incelemişlerdir. Neme maruz kalmanın mekanik özelliklerde önemli düşüşlere neden olduğunu belirtmişlerdir. Söz konusu testler sırasında biyokompozitlerin morfolojik karakterizasyonunu SEM kullanarak, biyonanokompozitlerin ise TEM ile analiz edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca hızlandırılmış hava koşullarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini de bildirmiş ve sonuçları SEM analizi ile doğrulamışlardır. Destile suya daldırma SEM ve TEM analizleri ile teyit edildiği gibi, fiber oryantasyonundaki değişiklik ve kompozitlerde mikro çatlak oluşumu nedeniyle biyokompozitlerin, biyonanokompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulmasına neden olduğunu vurgulamışlardır.

Arrieta vd. (2017) çalışmalarında gıda paketleme uygulamaları için geleneksel petrokimya bazlı polimerler yerine kullanılabilecek PLA ve PHB malzemelerinden eriyik harmanlama yaklaşımıyla karışım oluşturmuşlardır. Benzer bir erime sıcaklığı ve yüksek kristallik özellikleri ile PHB'nin PLA ile karıştırmak için iyi bir aday olduğunu vurgulamışlardır. PHB'nin PLA için bir çekirdekleştirici ajan olarak; hareket etme yeteneğini, karışımın mekanik direncini ve bariyer performansını geliştirdiğini söylemişlerdir. Yapılan FTIR testlerinde PLA ve PHB yarı kristalli polimerler olduğundan, FTIR spektral profillerinin karşılık gelen fiziksel durumlarından ve kristal yapılarından büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. PLA bileşeninin varlığının PHB'nin hidrolitik bozunmasını hızlandırdığını, PHB'nin, PLA'yı kristalize ederek daha yüksek bariyer performansına ve daha iyi mekanik dirence sahip malzemelere yol açtığını bildirmişlerdir.

Ausejo vd. (2018) yaptıkları çalışmada PLA ve PLA/PHA ticari filamentlerinden 3B baskı ile elde edilen dambıl şeklindeki numunelerin özellikleri üzerinde yapı yönlerinin etkisi ve 50 °C ve 70 °C'de hidrolitik bozunmasını araştırmışlardır. Yatay ve dikey olarak numuneler basmışlardır. Yatay yönde basılan PLA/PHA numunelerin orta bölümünün alt katman yüzeyindeki platformla aynı sıcaklığa sahip olduğunu ve dolayısıyla kristalleşme hızının dikey yönde basılan numunelerden daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Dikey yönde basılan numunelerin orta kısmının platforma daha uzak ve platforma göre daha düşük sıcaklıkta olduğu için en düşük kristalleşme hızının gözlemlendiğini söylemişlerdir. Numunelerin 3B yazıcı platformuyla temas süresinin baskı sırasında kristal fazda bir artışa yol açtığını belirlemişlerdir. Yatay yönde 3B baskı ile elde edilen hem PLA hem de PLA/PHA numunelerin daha düzenli olduğunu; genel olarak 3B basılı materyallerin uygulaması tasarlanırken 3B baskı yönünün dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğunu vurgulamışlardır.

Ayrilmis (2018) araştırmasında 1.75 mm kalınlığındaki ticari odun unu/PLA filamentinden (ağırlıkça %30 odun unu ve %70 PLA) yapılan 3B baskılı numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve ıslanabilirliği üzerine baskı kalınlığının etkisini araştırmıştır. Bu amaçla 3B baskılı numunelerin üretiminde 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm ve 0.3 mm olmak üzere dört farklı baskı kalınlığı kullanmıştır. Numunelerin yüzey özelliklerini değerlendirmek için Ra, Rz ve Ry pürüzlülük değerlerini dikkate almıştır. Numunelerin

yüzey özelliklerini yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (Mitutoyo SJ-301) kullanarak belirlemiştir. Numunelerin ıslanma davranışını temas açısı yöntemi (gonyometre tekniği) ile karakterize etmiştir. Azalan baskı kalınlığı ile numunelerin yüzey düzgünlüğünün önemli ölçüde arttığını, baskı kalınlığının artmasıyla numunelerin ıslanabilirliğinin önemli ölçüde arttığını tespit etmiştir. Baskı kalınlığı azaldıkça baskı süresinin uzamasından dolayı üretim süresinin uzadığını ve buna bağlı olarak toplam maliyetin arttığını belirtmiştir. Test sonuçları ve baskı süresi göz önüne alınarak 3B baskılı odun unu/PLA kompozit filamentleri için optimum baskı kalınlığının 0.2 mm olması gerektiğini önermiştir.

3B yazıcıda PLA ile basılan malzemelerde, dolgu yoğunluğu ve nozul sıcaklığı gibi parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. ASTM D638-4 standardında basılan çekme testi numuneleri oda sıcaklığında 5 mm/dk yer değiştirme hızında test edilmiştir. Nozul sıcaklığının artması ile numunelerin mekanik dayanımı artmıştır. Çekilen SEM görüntülerinde nozul sıcaklığının artması ile numunedeki boşluklu yapının azaldığı gözlemlenmiştir. Dolgu yoğunluğunun azalması ise numunenin çekme dayanımını düşürürken SEM görüntülerinde de çekme yönünde yükü taşıyan fiber sayısının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Kaygusuz & Özerinç, 2018).

Porfyris vd. (2018), yarı kristal ve amorf olan iki ticari poli(laktik asit) sınıfının hızlandırılmış higrotermal yaşlanması, temel bir bozunma mekanizması ve kinetiğini oluşturmak için çalışmışlardır. 70 °C ve %80 bağıl nemde (RH) nem ve sıcaklık koşullandırması sırasında özellikle su alımı, moleküler ağırlık, karboksilik uç grup konsantrasyonu ve termal özelliklerinin izlendiğini ve önemli ölçüde zincir kesilmesinin oluştuğunu söylemişlerdir. Daha sonra iki PLA derecesini stabilize etmek için farklı bileşime sahip dört ticari anti-hidroliz maddesinin etkisini incelemişlerdir. Katkı maddeleri olarak epoksi bazlı bir zincir uzatıcı, aromatik bir karbodiimid, aromatik ve alifatik poli karbodiimid kullanmışlardır. Epoksi bazlı katkı maddesinin herhangi bir stabilize edici etki göstermezken, diğer üç karbodiimid bazlı katkı maddesinin özellikle amorf derece durumunda %1'lik bir konsantrasyonda anti-hidroliz ajanları olarak etkili bulunduğunu belirtmişlerdir.

Çiçek (2019) tarafından yapılan tez çalışmasında Eriyik Yığma Modelleme teknolojisi kullanılarak PLA ve ABS filamentlerden üretilen numunelerin dolgu

oranlarının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. %25, 50, 75 ve 100 dolgu oranlarında üretilen numunelere 5mm/dk hızında çekme testi uygulanmıştır. Bu test sonucunda ABS filamentinin dayanımının PLA'dan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca dolgu yoğunluğu arttıkça numunelerin dayanımının da buna paralel olarak artış gösterdiği rapor edilmiştir. ABS ve PLA filamentlerden üretilen numunelerin gevrek şekilde kırıldığı ve buna paralel olarak numunelerin çekme grafiklerinde görülen akma dayanımını geçtikten sonra kısıtlı uzama gösterdikleri belirtilmiştir.

Guo vd. (2019) çalışmalarında EYM ile PLA/odun unu/termoplastik poliüretan kompozitlerin elektriksel ve termal iletkenliğini geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Elde ettikleri SEM görüntülerinde saf PLA'nın kırılma yüzeyinin pürüzsüz olduğunu ve bunun da tipik bir gevrek kırılmanın göstergesi olduğunu belirtmişlerdir. Grafitin ise tabaka benzeri bir pul gibi göründüğünü ve grafit pullarının polimer matrisinde rastgele dağıldığını söylemişlerdir. Numunelere yapılan mekanik testlerde ise kompozitlerin çekme mukavemeti ve kopma uzamasının ağırlıkça %5-20 grafit ilavesi ile arttığını ve %10 grafit ilavesi ile maksimuma ulaştığını rapor etmişlerdir. Grafit içeriğinin artmasıyla matrisin sürekliliğinin değiştiğini, topaklaşmadan dolayı zayıf dağılımın olduğunu bu nedenle kompozitin tokluğunun azaldığını ve kırılganlığının arttığını, buna benzer yapılan diğer çalışmalarda da benzer sonuçların bulunduğunu belirtmişlerdir.

Kamau-Devers, Kortum & Miller (2019) yaptıkları arşatırmada biyo-bazlı kompozit olan odun unu dolgulu PLA'nın hidrotermal bozulmasını, nem emilimini, morfolojisini ve termal iletkenliğini incelemişlerdir. Dolgu maddesi olarak ağırlıkça %0, 10 ve 30 odun unu içeren kompozitleri tamamen suya daldırılmış halde veya tamamen kuru halde dört sıcaklıkta (7 °C, 25 °C, 35 °C ve 47 °C) şartlandırmışlardır. Sıcaklıktaki artışın, nem alma oranındaki ve kristalleşme miktarındaki artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Suya daldırılmış numunelerin kristallik derecelerindeki artışlarla bağlantılı olarak camsı geçiş ve erime sıcaklıklarındaki düşüşlerin, kurutulmuş PLA numuneler ile karşılaştırıldığında açık bir şekilde belirlendiğini vurgulamışlardır.

Patan (2019) yaptığı yüksek lisans çalışmasında ABS ve kırpılmış karbon elyaf takviyeli ABS filamentler kullanarak 3 boyutlu yazıcıda ASTM D638 Tip-I standardına uygun çekme testi numuneleri üretmiş ve numunelerin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. ASTM standartlarına uygun yapılan çekme testinde 5 mm/dk çekme

hızıyla numunelerde kopma meydana gelene kadar yük uygulamıştır. Deney sonuçlarını kullanarak numunelerin maksimum gerilmelerini ve şekil değiştirme enerjilerini ANSYS programında von Mises kriterine göre numerik olarak analiz etmiştir. Mekanik deneyler sonucunda, karbon elyaf takviyeli ABS numunelerinin eğilme ve basma dayanımlarının takviyesiz ABS numunelerine göre sırasıyla %23.9 ve %14.75 daha yüksek olduğunu rapor etmiştir. Deneysel mekanik sonuçların girdi olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen analitik gerilme analizlerinde her iki numune türü için de çekme, basma ve eğilme davranışlarını minimum sapmalar ile modellemiş ve analiz etmiştir.

Kakanuru & Pochiraju (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada PLA, silisyum karbür (SiC) dolgulu PLA kompozitleri ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) kullanılarak kaynaşmış filament imalatı (FFF) ile yapılan parçaların nem emilimini ve yaşa bağlı bozunmasını incelemişlerdir. PLA ve PLA/SiC kompozit numunelerinin higroskopik stabilitesini ABS numuneleri ile karşılaştırmışlardır. Hem filamentleri hem de çekme testi numunelerini destile suda 50 °C ve 70 °C'de 140 gün veya tamamen bozunana kadar yaşlandırmışlardır. Polimerin bozunmasını nem emme-desorpsiyon özelliklerindeki ve çekme mukavemetindeki bozulmadaki farklılıkları gözlemleyerek tanımlamışlardır. Deneysel sunuçlarda PLA ve ağırlıkça %20 SiC/PLA numunelerinin 50 °C'de 58 günde bozunduğunu, daha yüksek oranda SiC içeren SiC/PLA numunelerin ise 140 gün boyunca stabilitelerini koruduğunu söylemişlerdir. Numunelerde malzemenin parçalanması nedeniyle büyük boşluklar olduğunu, yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numuneler arasındaki boşluk geometrisini de SEM görüntülerinin doğruladığını göstermişlerdir.

Przekop vd. (2020) yürüttükleri araştırmada PLA'nın diğer biyopolimerler gibi düşük darbe mukavemeti, zayıf gaz bariyeri, zayıf ısı direnci, düşük kristalleşme oranı gibi bazı dezavantajları olduğunu ve bilim adamlarının kompozit yaparak üstün özellikli malzeme arayışı içinde olduklarını söylemişlerdir. Bunun için PLA ile modifiye edilebilecek katkı maddelerinden birinin düşük fiyatı, mükemmel termal ve elektriksel özellikleri nedeniyle grafit olduğunu belirtmişlerdir. Grafitin, polimerik malzemelerin yağlayıcı özelliklerini çok iyi geliştirerek sürtünmenin azalmasını ve aşınma dayanımlarının artmasını sağladığını vurgulamışlardır. Ağırlıkça %1, 2,5, 5, 7,5 ve 10 grafit oranları seçilerek ürettikleri numunelerin aşınma, mekanik ve kimyasal

özelliklerini incelemişlerdir. Numunelere yaşlandırma işleminden sonra da ölçümler yapmışlardır. Numunelerin sürtünme testleri öncesi ve sonrası SEM görüntülerini almışlardır. Artan grafit içeriği ile aşınmada önemli bir azalma olduğunu belirlemişler ve PLA+%10 grafit kompozit numunesinin referans PLA numunesine göre 3 kat daha düşük bir aşınma oranına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yaşlandırma sonrası PLA+%10 grafit kompozit numunesinin referans PLA numunesine kıyasla %11 daha düşük kırılma gerilimine, %47 daha düşük darbe dayanımına ve %21 daha yüksek Young modülüne sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca grafit ilavesinin elde edilen kompozitlerin hidrofobik özelliklerinde önemli bir artışa neden olduğunu ve malzemenin camsı geçiş sıcaklığını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Siracusa vd. (2020), ambalaj endüstrisinde petrol polimerlerinin yerini almak için kullanılabilecek gerçek rakipler olarak poli (3-hidroksibutirat) (PHB) ve PLA olmak üzere iki polyestere dayalı tamamen biyo-bazlı karışımlar üretmek amacı ile çalışma yapmışlardır. Poli(3-hidroksibutirat) (PHB)'nin, fosil bazlı sentetik ambalajın yerini alma potansiyelinin yüksek olduğunu gösteren PHA ailesinin başlıca ve en yaygın kullanılan üyesi olduğunu vurgulamışlardır. Film şeklindeki PHB/PLA karışımlarını 1/0, 1/9, 3/7, 5/5, 0/1 oranlarında hazırlamışlardır. Homopolimerik durumda PHB'nin ağırlıkça %70-75'e kadar son derece büyük bir kristalliğe yol açan yüksek bir stereo-düzenlilik gösterdiğini belirtmişlerdir. Biyopolimer kristal varlıklarının (kristaller, lameller, sferülitler) ve kristaller arası geçiş zincirlerinin optimal kombinasyonunun yaklaşık 2.5-3 GPa'lık yüksek elastikiyet modülü ve 35-40 MPa'lık kopmada çekme mukavemeti gibi uygun mekanik özellikleri desteklediğini belirtmişlerdir. Bu biyopolimerin genişleme lamelleri ve sferülit morfolojisinin atmosferik gaz halindeki bileşenler ve su buharı için uygun düşük geçirgenlik değerlerine sahip iyi bir bariyer yapısı oluşturduğunu vurgulamışlardır.

Uzun & Erdoğdu (2020), 1.75 mm çapında %20 bakır takviyeli ve %20 karbon fiber takviyeli kompozit PLA, Frosch markalı PLA filamentler üzerinde çalışmışlardır. Her filamentten eriyik yığma modellemesi yöntemi ile 3B yazıcıda çekme numuneleri üretmişler ve deney sonucu numune kırılma yüzeylerinin TEM görüntülerini almışlardır. Çekme testlerini 10 kN yük kapasiteli çekme cihazında, 65 mm çeneler arası mesafede ve 5 mm/dk çekme hızında uygulamışlardır. Yaptıkları deneyler sonrası PLA malzemeye bakır ve karbon fiber takviye yapılarak üretilen kompozit filamentlerin

çekme dayanımlarının azaldığını belirlemişlerdir. Bu dayanım azalmasının yapılan takviyelerin matrisin sürekliliğini azaltmasından ve arayüz yapışmasını zayıflatmasından kaynaklı olduğunu vurgulamışlardır. PLA numuneler bakır ve karbon fiber takviyeli numunelere nazaran daha sünek kırılırken, bakır katkılı kompozit PLA numunenin gevrek şekilde kırıldığını rapor etmişlerdir.

BÖLÜM 4

MATERYAL ve METOT

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Deneylerde Kullanılan Filamentler

1 - Deneylerde PLA'dan üretilmiş 1.75 mm çapında 0.5 kg ağırlıkta makaraya sarılı ve vakumlu pakette bulunan filament kullanılmıştır. Tüm deneylerde filamentler baskı öncesi vakumlu poşetinden çıkarılmış ve daha sonra kalan filamentler desikatör içerisinde saklanmıştır. Filamente ait teknik özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PLA filamentin teknik özellikleri.

Üretici Firma	Microzey
Malzeme Cinsi	PLA
Renk	Beyaz
Filament Net Ağırlık	500 gr±10 gr
Filament Uzunluk	170 m
Filament Yoğunluk	1.24 g/cm^3
Filament Çapı	1.75 mm/±0.05 mm
Makara Ağırlık	195 g
Tavsiye Edilen Baskı Sıcaklığı	200-220 °C
Tavsiye Edilen Baskı Tabla Sıcaklığı	60-80 °C
Tavsiye Edilen Baskı Hızı	25-100 mm/s
Baskı Tabla Önerisi	Buildtak/pei
Depolama	Işıksız, nemsiz ortamda ve ambalajında

2 - Deneylerde PLA/PHB'den üretilmiş 1.75 mm çapında 0.75 kg ağırlıkta makaraya sarılı ve vakumlu pakette bulunan PLA/PHB kompozit filament kullanılmıştır. PLA/PHB kompozit filament %60 oranında PHB, %30 oranında PLA ve %10 oranında katkılardan oluşmaktadır. Filamente ait teknik özellikler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PLA/PHB kompozit filamentin teknik özellikleri.

Üretici Firma	Fillamentum
Malzeme Cinsi	PLA/PHB (%30 PLA /%60 PHB)
Renk	Doğal
Filament Net Ağırlık	750 gr
Filament Uzunluk	250 m
Filament Yoğunluk	1.20 g/cm^3
Filament Çapı	1.75 mm/±0.05 mm
Makara Ağırlık	210 g
Tavsiye Edilen Baskı Sıcaklığı	175-195 °C
Tavsiye Edilen Baskı Tabla Sıcaklığı	0-50 °C
Baskı Tabla Önerisi	PVA yapıştırıcı/3dlac
Depolama	Işıksız, nemsiz ortamda ve ambalajında

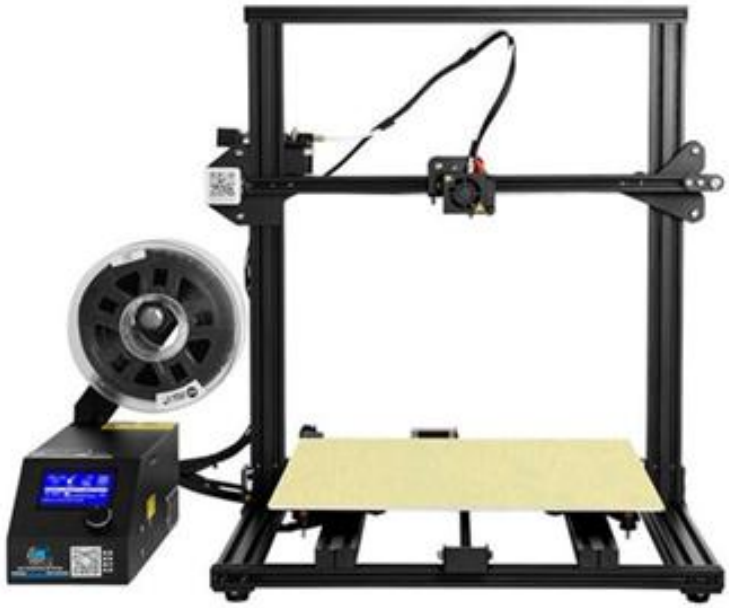
3 - Deneylerde PLA/Grafit'ten üretilmiş 1.75 mm çapında 50 m uzunluğunda makaraya sarılı ve vakumlu pakette bulunan PLA/Grafit kompozit filament kullanılmıştır. PLA/Grafit kompozit filament %99 oranında Natureworks Ingeo^{TM} Biopolymer 4043d PLA ve %1 oranında %99.99 saflıkta 44 mikron (325 mesh-0.044 mm) grafitten oluşmaktadır. Filamente ait teknik özellikler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. PLA/Grafit kompozit filamentin teknik özellikleri.

Üretici Firma	Filameon
Malzeme Cinsi	PLA/Grafit (%99 PLA/%1 Grafit)
Renk	Doğal
Filament Uzunluk	50 m
Filament Çapı	1.75 mm/±0.03 mm//±0.04 mm
Tavsiye Edilen Baskı Sıcaklığı	200-230 °C
Tavsiye Edilen Baskı Tabla Sıcaklığı	50-70 °C
Depolama	Işıksız, nemsiz ortamda ve ambalajında

4.2. Kullanılan Cihazlar

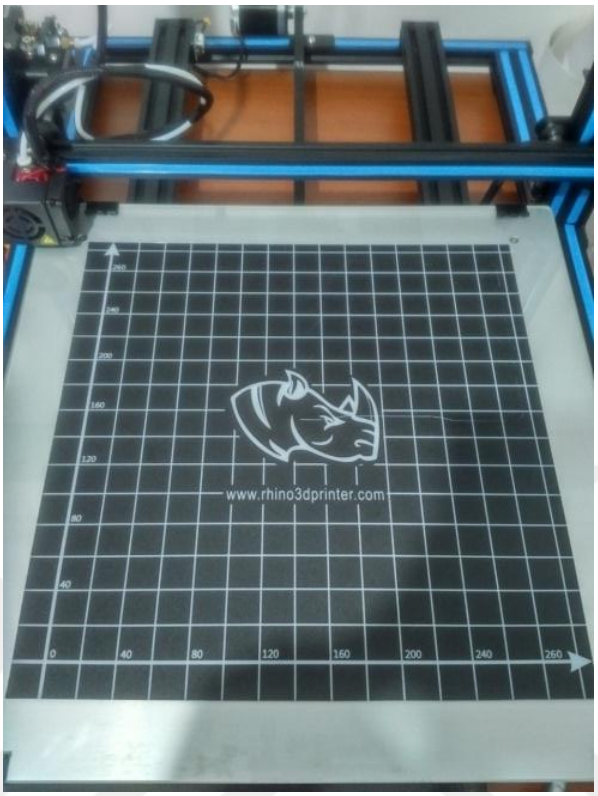
Deneylerde kullanılan numunelerin üretilmesi için, teknik özellikleri 3B yazıcılar bölümünde verilen Creality marka CR-10 S4 tipi FDM teknolojili 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 4.1). Yazıcının kurulumu ve baskı öncesi tüm kalibrasyonları tarafımızca gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yazdırılmasından önce örnek kontrol baskıları alınmış ve boyutsal kontrolleri ile yüzey kontrolleri yapılmıştır. Her baskı sonrasında cihaz için gerekli bakımlar ve kontroller yapılmıştır. Böylece basılan numunelerin doğruluğunun sürekliliği sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Creality CR-10 S4 3B FDM yazıcı.

3B yazıcılarda metal olan yazıcı tablasına veya üzerine konan cama yazdırılan ürünlerde ilk katmanda tablaya yapışmama veya ürünün tabladan sökülmesi esnasında ise sökme problemleri yaşanabilmektedir. Bu problemin önlenmesi için tabla veya cam üzerine bant yapıştırılması, yapıştırıcı sürülmesi, saç spreyi sıkılması gibi kullanılan çeşitli çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Ancak, bu tarz uygulamalar baskının ilk katmanındaki yüzeyi etkilemektedir. Bu problemlerin önüne geçilebilmesi için numuneler yazdırılmadan önce, yazıcı tablasına daha kalıcı çözüm sunan ince ve dayanıklı plastik bir levhadan yapılan buildtak yapıştırılmıştır. Buildtak ısıya dayanıklı sert bir plastik malzemedir. Tablaya yapıştırılan buildtak sayesinde numune

baskılarında ilk baskı katmanının yapışma problemi yaşanmamış ve basılmış numuneler herhangi bir hasara uğramadan tabla yüzeyinden kolayca sökülebilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Yazıcı tablası üzerine yapıştırılmış buildtak.

Numunelerin şartlandırılması için cam kap, 100 watt termostatlı su ısıtıcısı, sirkülasyon pompası, dijital ve analog termometreden oluşan sistem kullanılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Su içerisinde şartlandırmanın yapıldığı sistem.

Numunelerin şartlandırılması için sıcaklığın ve nemin dijital olarak ayarlanabildiği iklimlendirme kabini kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. İklimlendirme kabini içindeki numuneler.

Üretilen numunelerin saklanması için içerisinde nem alıcı bulunan ve hava geçirmeyen desikatör kullanılmıştır.

Kemik ve filament numunelere ait çekme deneyleri Tinius Olsen marka H10KS materyal test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Tinius Olsen marka H10KS materyal test cihazı.

Numunelere ait SEM görüntüleri Zeiss marka EVO® LS10 cinsi elektron mikroskobunda çekilmiştir.

FTIR analizleri Perkin Elmer Frontier cihazında yapılmıştır.

Numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi için PCE marka RT 10 cinsi yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. PCE-RT 10 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

4.3. Deneysel Kısım ve Yöntemler

Deneysel çalışmalar altı aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada herhangi bir ortama maruz bırakılmayan filamentlerden referans çekme numuneleri basılmıştır. İkinci aşamada kemik ve filament numuneler 25 °C su, 25 °C ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiştir. Üçüncü aşamada 25 °C su, 25 °C ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş filamentlerden çekme numuneleri basılmıştır. Dördüncü aşamada çekme numunelerinin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Beşinci aşamada numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur. Altıncı aşamada numunelere FTIR spektrometresi ile analiz yapılmış ve kırılma yüzeylerinin SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri alınmıştır.

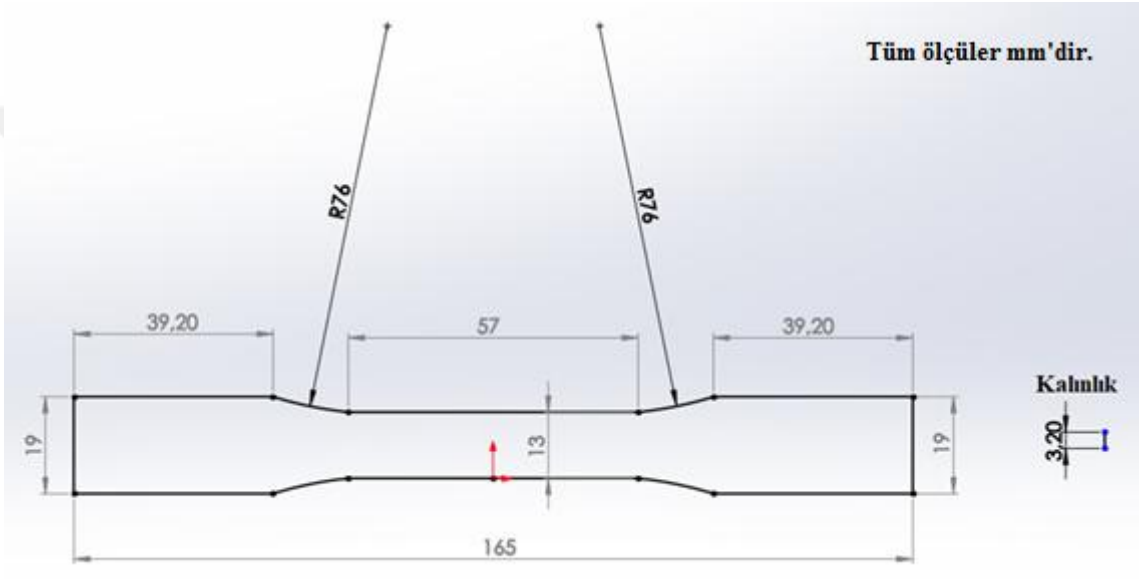
4.3.1. Numunelerin Üretilmesi

PLA'dan üretilmiş numunenin (Şekil 4.7) çekme dayanımının belirlenmesi için numuneler ASTM D638-14 (Plastiklerin Çekme Özellikleri için Standart Test Yöntemi)

Standardı Tip I numuneye uygun ölçülerde hazırlanmıştır. Numune şekli ve boyutları Şekil 4.8'de verilmiştir.

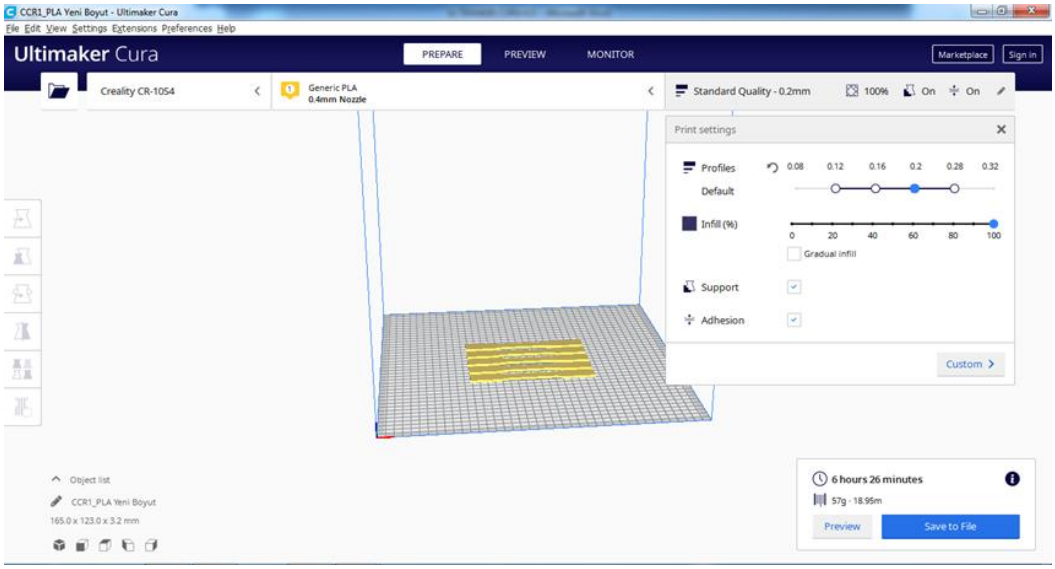


Şekil 4.7. Çekme numunesi.



Şekil 4.8. ASTM D638-14 Tip I'e göre çekme (kemik) numunesi boyutları.

Numunelerin 3B yazıcıda yazdırılabilmesi için dilimleyici yazılımı olan Ultimaker Cura 3B baskı yazılımı kullanılmıştır (Şekil 4.9). Numuneler ilk olarak CAD programında daha önce verilen standarta uygun ölçülerde tasarlanmış ve tasarım STL dosya formatında kaydedilmiştir. STL dosyası daha sonra Cura dilimleme yazılımında açılmış, programda yazıcı seçimi yapılmış ve numunelerin yazdırma parametreleri ayarlanmıştır. PLA numunelerin, PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit numunelerin yazdırılması için kullanılan parametreler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

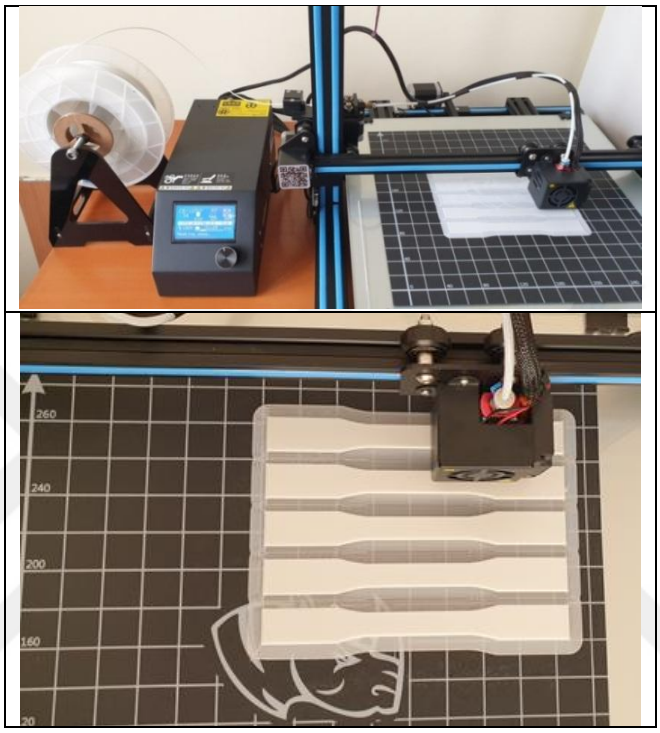


Şekil 4. 9. Ultimaker Cura yazılımında yazdırma parametrelerinin ayarlanması.

Çizelge 4.4. PLA numuneleri, PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit numuneleri yazdırmak için kullanılan yazdırma paremetreleri.

Filament Cinsi	**PLA**	**PLA/Grafit**	**PLA/PHB**
Nozul			
Nozul Çapı	0.4 mm	0.4 mm	0.4 mm
Kalite			
Katman Yüksekliği	0.2 mm	0.2 mm	0.2 mm
Dış Kaplama			
Duvar Kalınlığı	1.2 mm	1.2 mm	1.2 mm
Üst Kalınlık	0.8 mm	0.8 mm	0.8 mm
Alt Kalınlık	0.8 mm	0.8 mm	0.8 mm
Dolgu			
Dolgu Yoğunluğu	%100	%100	%100
Dolgu Şekli	Grid	Grid	Grid
Malzeme			
Yazdırma (Nozul) Sıcaklığı	210 °C	215 °C	180 °C
Yazdırma (Baskı) Tablası Sıcaklığı	60 °C	60 °C	50 °C
Hız			
Yazdırma Hızı	60 mm/s	35 mm/s	35 mm/s
Gezinti			
Geri Çekmeyi Etkinleştirme	Evet	Evet	Evet
Soğutma			
Baskı Soğutma Etkinleştirme	Evet	Evet	Hayır
Fan Hızı	%100	%100	-
Destek			
Destek Oluşturma	Evet	Evet	Evet
Destek Yerleşimi	Heryere	Heryere	Heryere
Destek Çıkıntı Açısı	45°	45°	45°
Baskı Tabla Yapışması			
Baskı Tabla Yapışması Çeşidi	Brim	Brim	Brim

Çekme deneylerinde kullanılacak olan kemik numuneler verilen yazdırma parametreleri uygulanarak 3B yazıcıda yazdırılmıştır. Tüm yazdırma işlemleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her bir yazdırma işleminde 5 adet numune yazdırılmıştır (Şekil 4.10). Yazdırılan tüm numunelere yapılacak deneysel çalışmalara göre seri numaraları verilmiştir.



Şekil 4.10. Kemik numunelerin yazdırılması.

4.3.2. Numunelerin Şartlandırılması

Üretilen kemik numuneler ve filament numuneler suyun ve nemin PLA üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için farklı ortam şartlarında ve sürelerde şartlandırılmıştır. Bunun için aynı sıcaklıktaki su ve nemli ortam kullanılmıştır.

Birinci grup numuneler 25±0.5 °C sıcaklıktaki su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmişlerdir. Su sıcaklığı termostat ile sabitlenmiştir.

İkinci grup numuneler 25±0.5 °C sıcaklık ve %80±2 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmişlerdir. Kabin içerisindeki sıcaklık ve nem değeri belirli aralıklarla kontrol edilmiştir.

Üçüncü grup PLA/PHB ve PLA/Grafit kompozit filamentler ise 25±0.5 °C sıcaklık ve %80±2 bağıl nemli ortam içerisinde 15 gün süre ile bekletilmişlerdir.

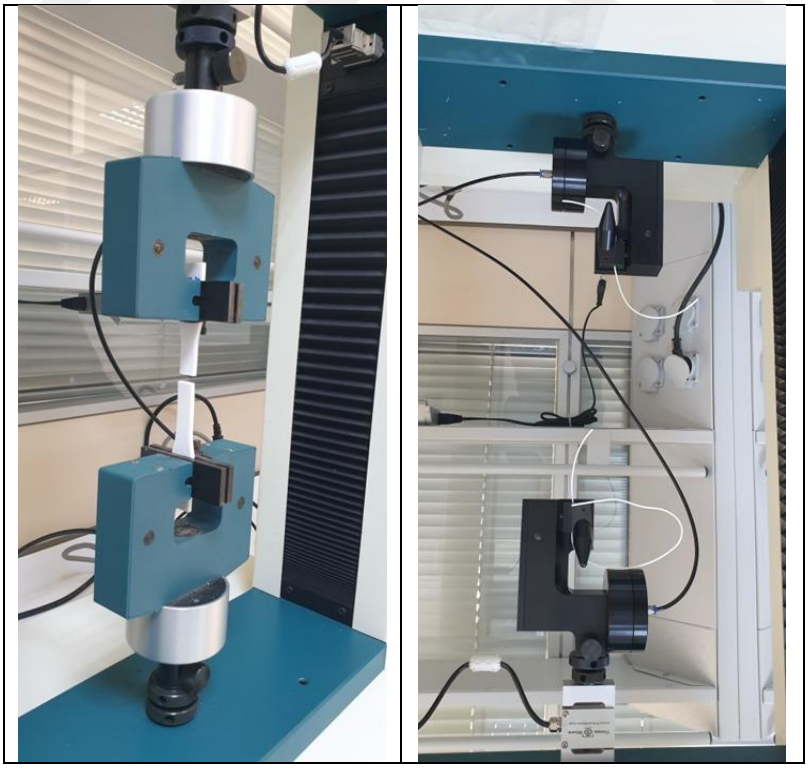
4.3.3. Numunelerle Yapılan Analiz ve Deneyler

Numunelere uygulanan tüm çekme deneyleri oda sıcaklığında uygulanmıştır. Çekme deneyleri esnasında cihazdan çekme kuvveti (N) ve yer değiştirme (mm) değerleri elde edilmiştir. Kemik numunelere çekme deneyi 5.0 mm/dk kafa ilerleme hızında uygulanmıştır (Şekil 4.11). Filament numunelere ise çekme deneyi 200.0 mm/dk kafa ilerleme hızında uygulanmıştır (Şekil 4.11).

Seçilen belirli filament ve çekme numunelerine malzeme yapısındaki değişimin anlaşılabilmesi için FTIR analizleri yapılmıştır.

Numunelere ait baskı ve kırılma yüzeylerinin incelenebilmesi için bu yüzeylerden SEM görüntüleri 50-2000x büyütme aralıklarında alınmıştır.

Çekme numunelerinin baskı sonrası yüzey kalitelerinin belirlenebilmesi için numune yüzeylerinin pürüzlülükleri ölçülmüştür. Her numune yüzey pürüzlülüğü ölçümünden önce cihaz kendi kalibrasyon tablası ile kalibre edilmiştir. Tüm numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri oda sıcaklığında, aynı yüzeyden ve aynı yönde olacak şekilde yapılmıştır.



Şekil 4.11. Kemik ve filament numunelerin çekme deneyi.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Tüm filament numunelere ve üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyleri sonucu test cihazından kuvvet (N) ve uzama (mm) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler yardımı ile numunelere ait çekme dayanımı (MPa)–uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Çekme deneyinden önce kemik numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Çekme deneyi uygulanan kemik numunelerin çekme deneyinden sonra kırılma yüzeyleri fotoğraflanmış ve SEM görüntüleri alınmış, daha sonra hem çekme numunelerine hem de filament numunelere FTIR analizleri yapılmıştır.

Yapılan tüm deneylerde PLA filament ve kemik numunelerden her grup için 5'er adet numune üretilmiş ve test edilmiştir. PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filament ve kemik numunelerden her grup için 4'er adet numune üretilmiş ve test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda her numuneye kısa kodlar verilmiştir. Verilen kısa kodların açıklamaları kısaltmalar dizininde mevcuttur. Örnek olarak FK2580-15-1 kısa gösteriminde FK şartlandırılmış filamentlerden basılan kemik numuneyi, 2580 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamı, 15 gün olarak şartlandırma süresini, 1 ise kullanılan 5 numuneden 1.'sini ifade etmektedir.

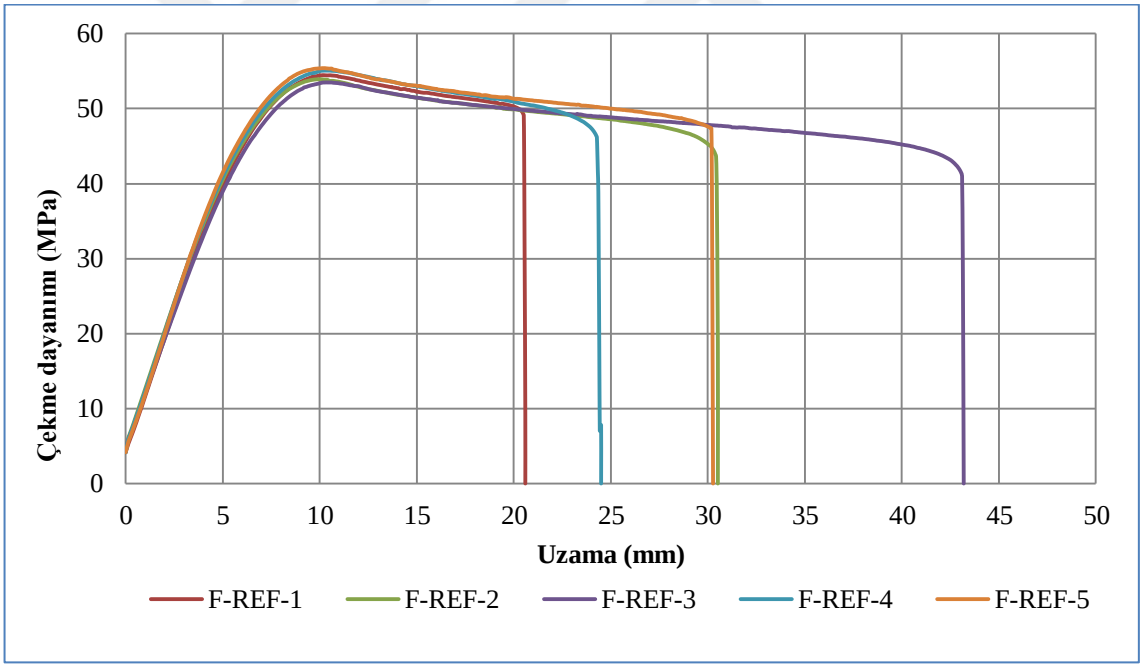
5.1. 25 °C Sıcaklıktaki Su İçerisinde Şartlandırılan PLA Numunelerin Mekanik ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Değerlendirilmesi

Şartlandırılan PLA numunelerdeki değişimlerin değerlendirilebilmesi için filament ve kemik numuneler 25±0.5 °C sıcaklıktaki su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmişlerdir. Daha sonra şartlandırılmış olan filamentlerden kemik

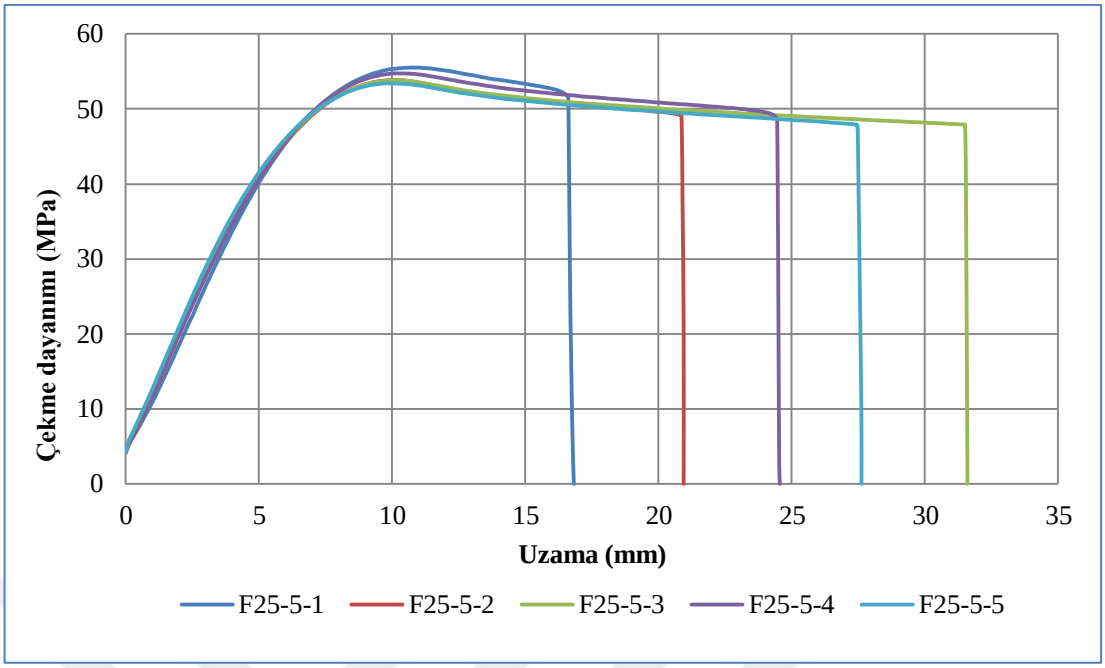
numuneler üretilmiş ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Şartlandırılmamış (referans) ve şartlandırılmış filament, kemik, şartlandırılmış filamentlerden üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmış, çekme deneyi sonrası belirli numunelerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri alınarak incelenmiş, kırılan numuneler fotoğraflanmış ve numunede oluşabilecek kimyasal veya fiziksel değişimlerin değerlendirilebilmesi amacı ile belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır.

5.1.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

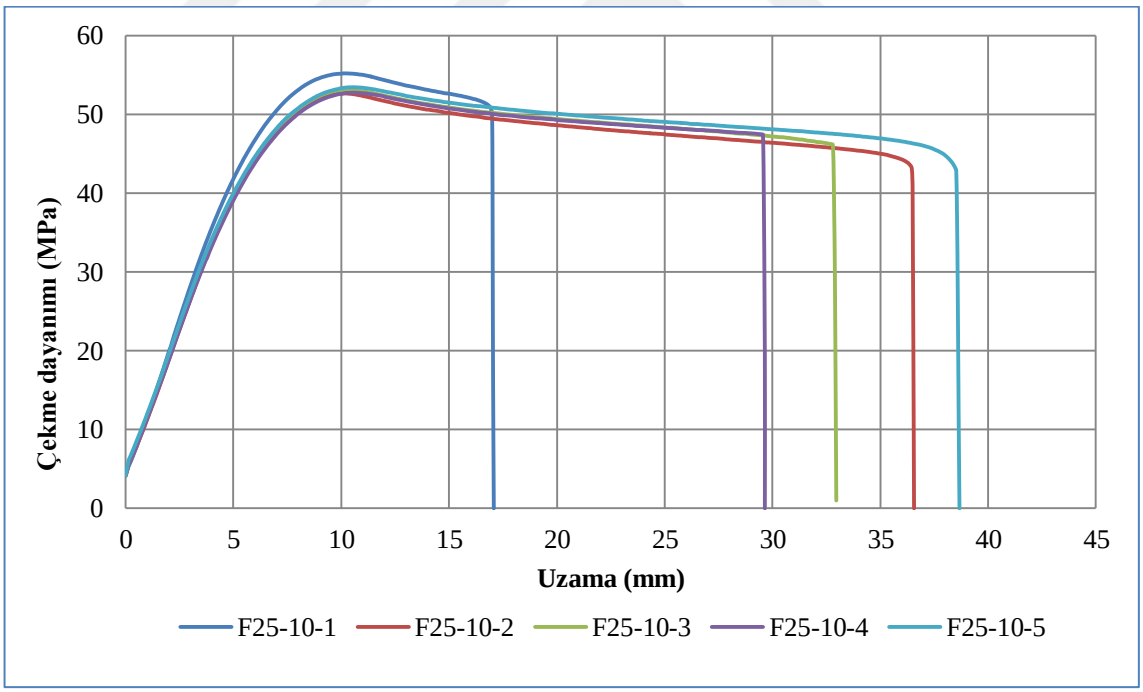
PLA filamenti 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Filament numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.1-5.5'te verilmiştir.



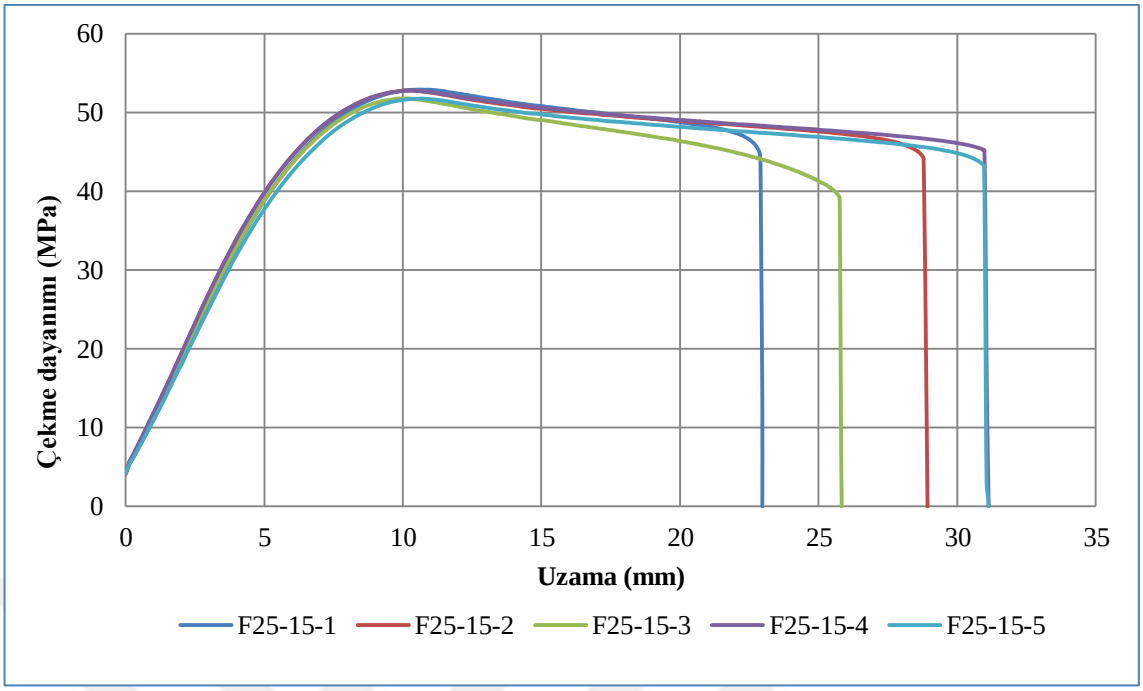
Şekil 5.1. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filament numunelerin çekme dayanımları.



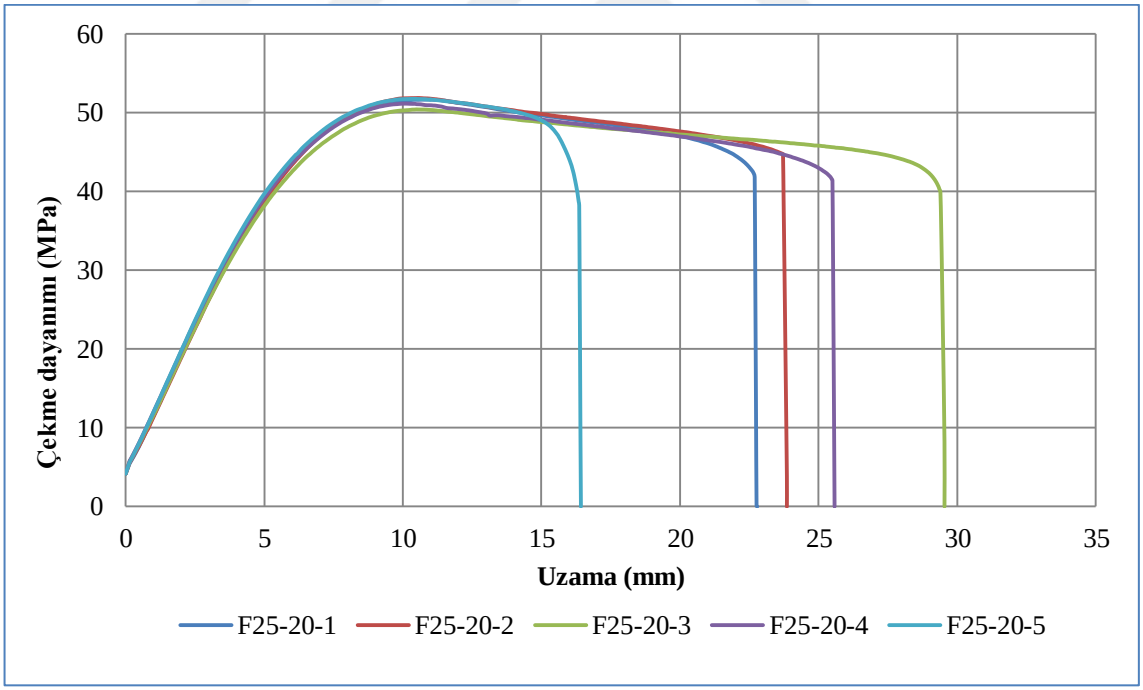
Şekil 5.2. 25 °C sıcaklıktaki suda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.3. 25 °C sıcaklıktaki suda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.4. 25 °C sıcaklıktaki suda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

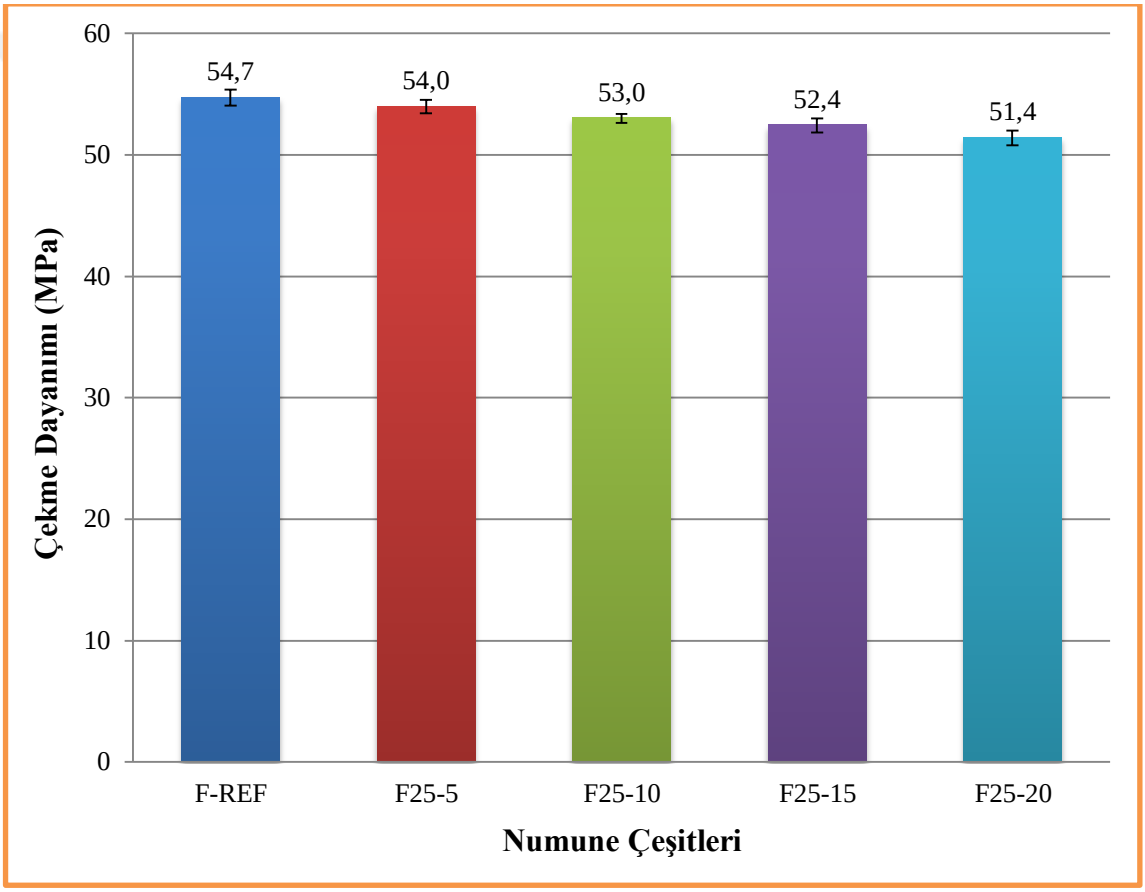


Şekil 5.5. 25 °C sıcaklıktaki suda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

Şekil 5.1-5.5 arasındaki filament numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri incelendiğinde referans ve şartlandırılmış tüm numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermişler belirli bir uzama gösterip kopmuşlardır. Bu da

malzemelerin sünek olduğunu göstermektedir. Numunelerin 25 °C sıcaklıktaki suda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde olumlu veya olumsuz yönde önemli bir etkisi olmamıştır.

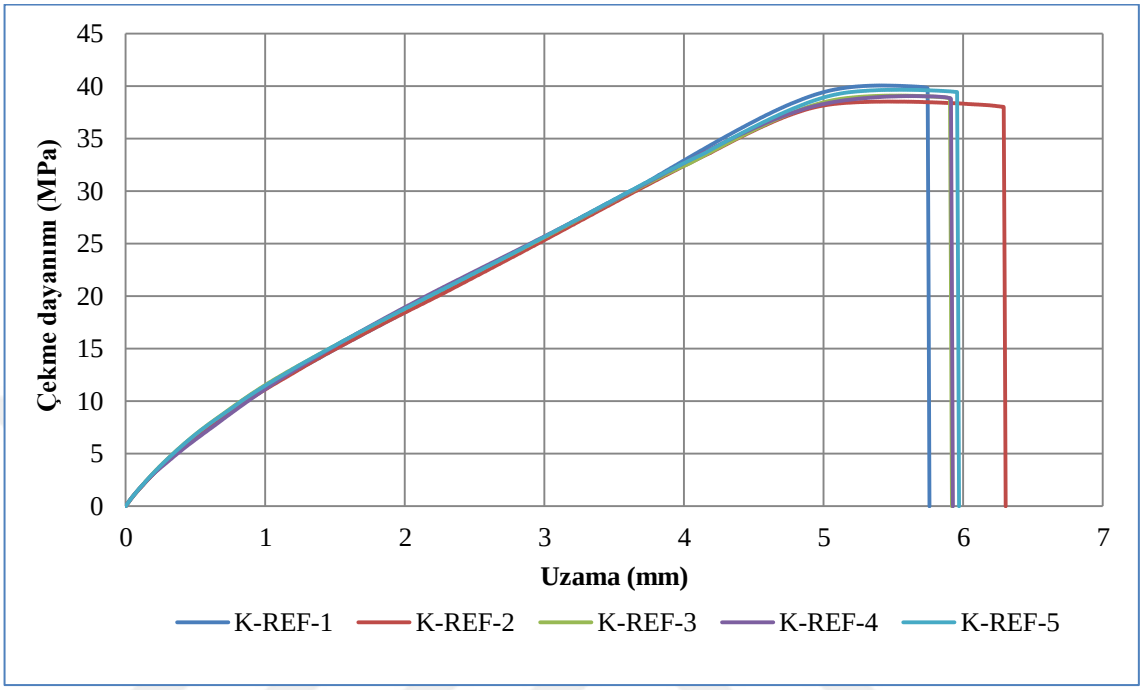
Filament numunelere ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 5.6) incelediğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde 20 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Su içerisinde bekletme süresinin artması ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları sürekli azalmıştır. 20 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %6 oranında daha düşüktür.



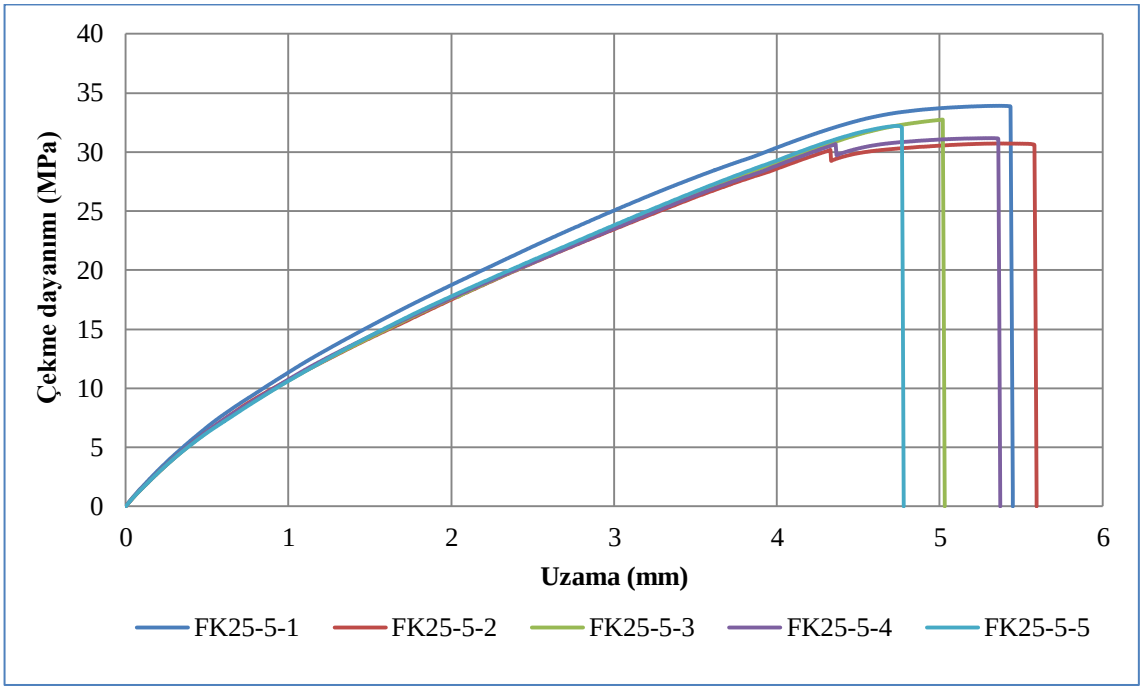
Şekil 5.6. Referans ve 25 °C su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

Şartlandırılmış PLA filamentten üretilen kemiklere 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için filamentler belirtilen ortamda belirtilen süreler ile şartlandırılmış ve daha sonra üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet

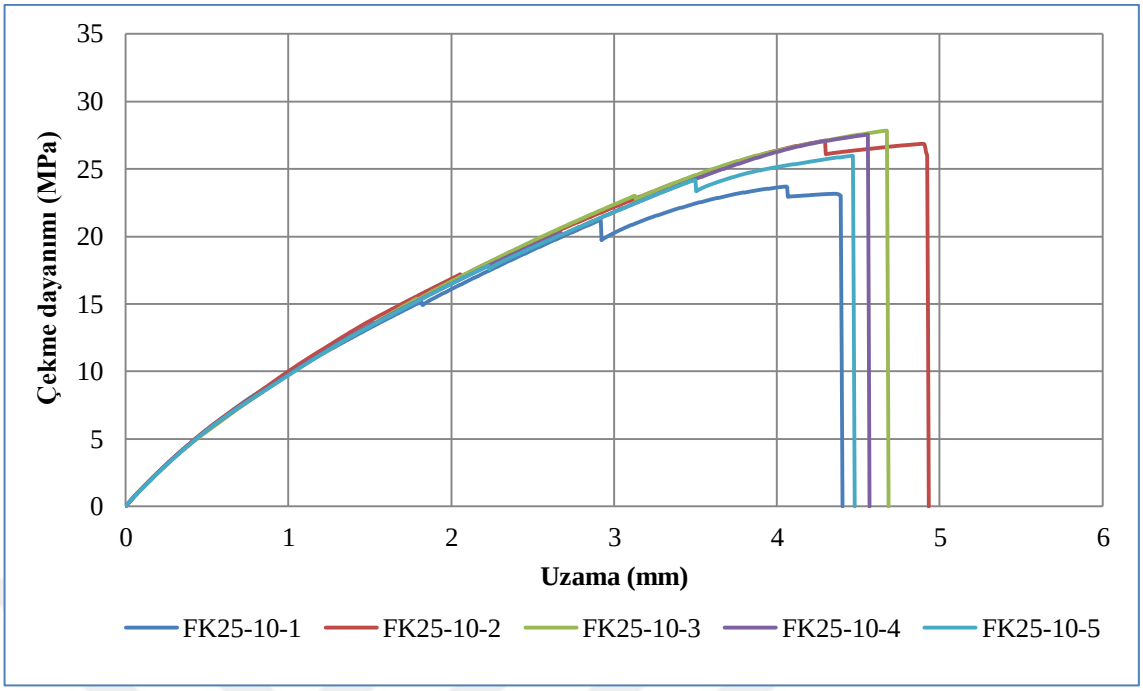
(N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Referans ve şartlandırılmış filamentlerden üretilen kemik numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.7-5.11'de verilmiştir.



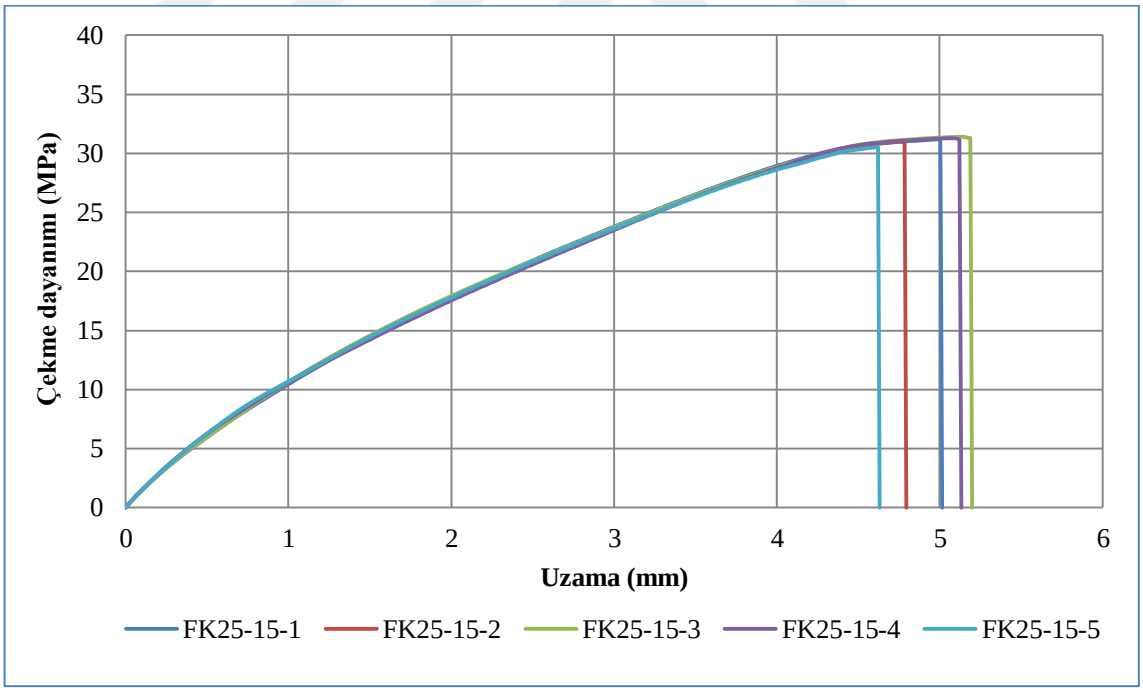
Şekil 5.7. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



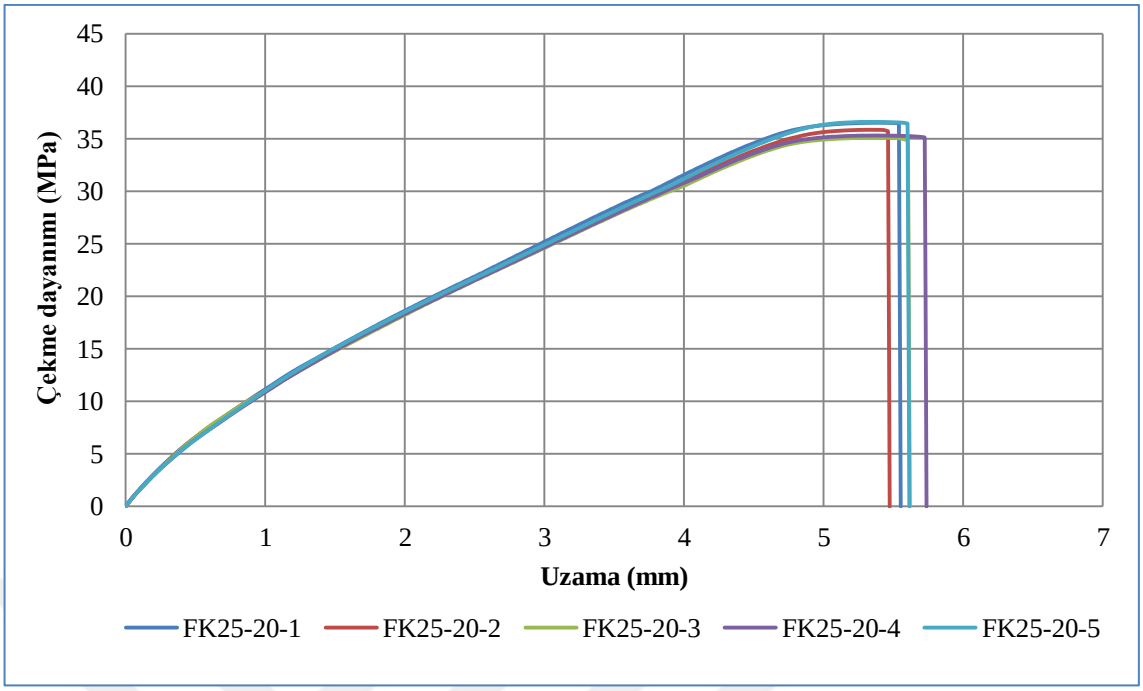
Şekil 5.8. 25 °C sıcaklıktaki suda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.9. 25 °C sıcaklıktaki suda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

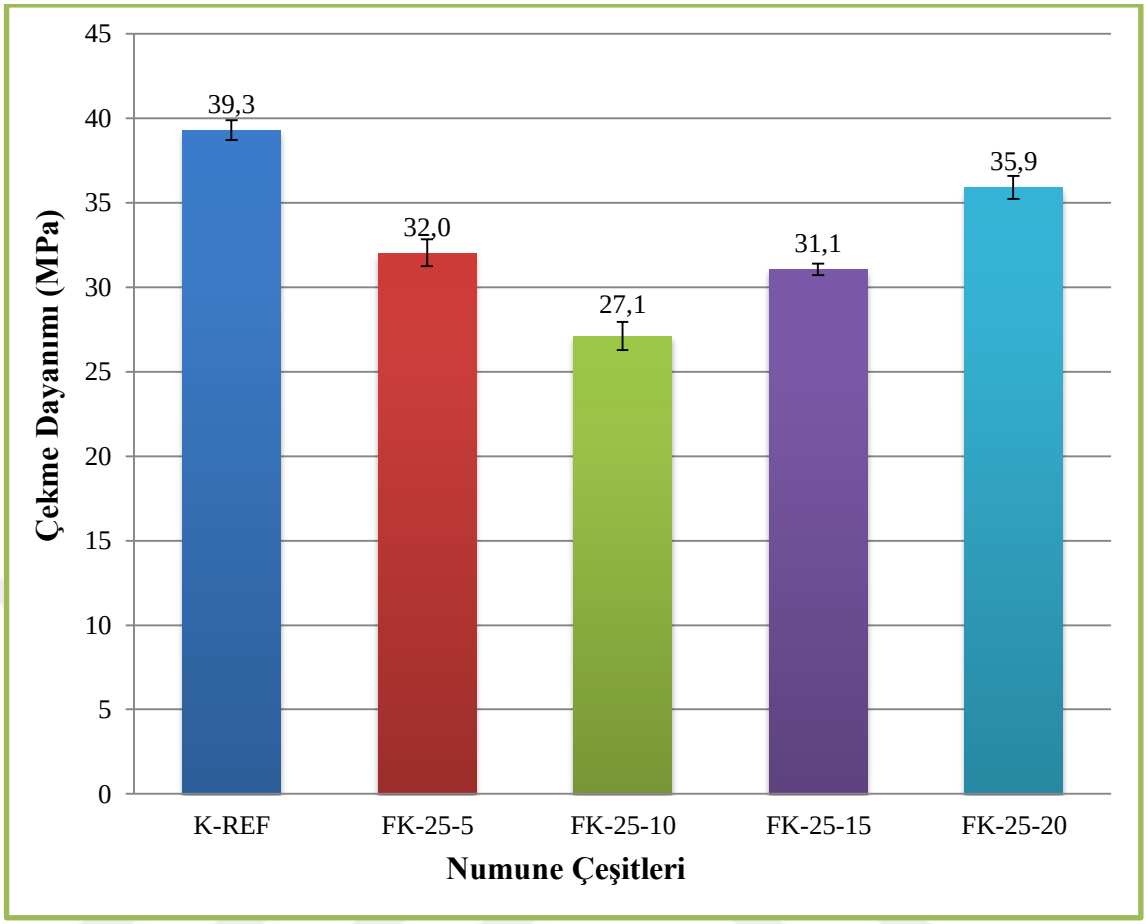


Şekil 5.10. 25 °C sıcaklıktaki suda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



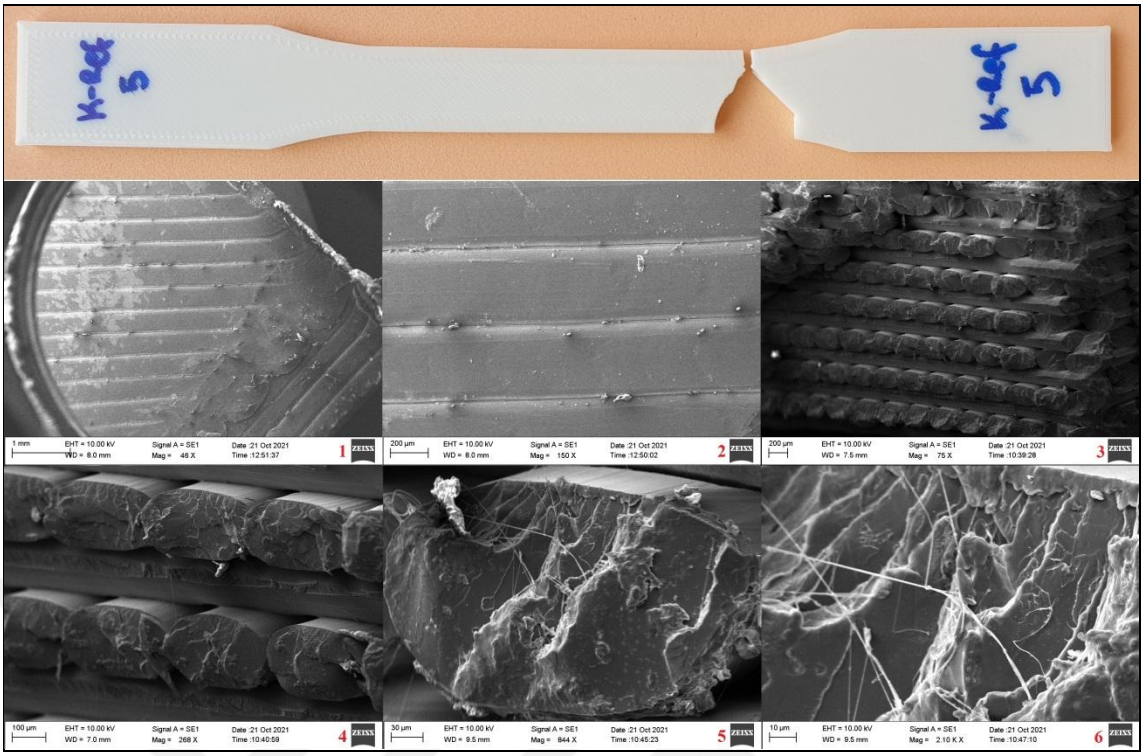
Şekil 5.11. 25 °C sıcaklıktaki suda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

Şekil 5.7-5.11 arasında referans ve şartlandırılmış filamentlerden basılan kemik numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri gösterilmektedir. Referans numuneye ait (Şekil 5.7) eğri incelendiğinde numune maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş belirli bir uzama gösterip kopmuştur. Bu da malzemenin yarı sünek olduğunu göstermektedir. Fakat şartlandırılmış filamentlerden basılan numunelere ait (Şekil 5.8-5.11) eğriler incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında kopmuşlardır. Bu da malzemenin gevrek olduğunu göstermektedir. Filamentlerin 25 °C sıcaklıktaki suda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin yazdırılan numunelerin sünek-gevrek davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Suda bekletme süresi farketmeksizin tüm numuler gevrek davranış sergilemişler ve maksimum yükte boyun vermeden kırılmışlardır.

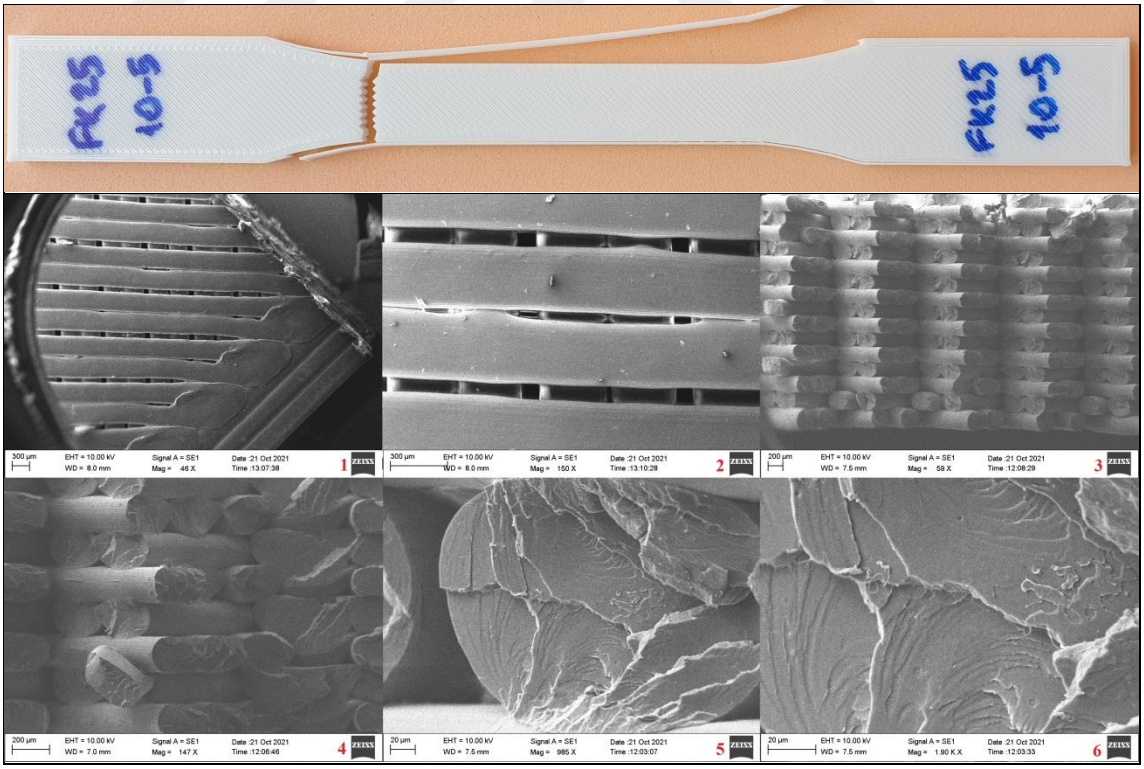


Şekil 5.12. Referans ve 25 °C su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

25 °C sıcaklıktaki suda bekletilmiş filamentlerden basılan numunelere ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 5.12) incelediğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde 10 gün bekletilmiş filamentten basılan numunede elde edilmiştir. Su içerisinde 5 ve 10 gün bekletme süresi ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. 15 ve 20 günlük bekletme sürelerinde ise çekme dayanımları 10 günlük numuneye nazaran artış göstermiştir. Fakat bu iki durumda da çekme dayanımları referans numuneden daha azdır. 10 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %31 oranında daha düşüktür.



Şekil 5.13. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

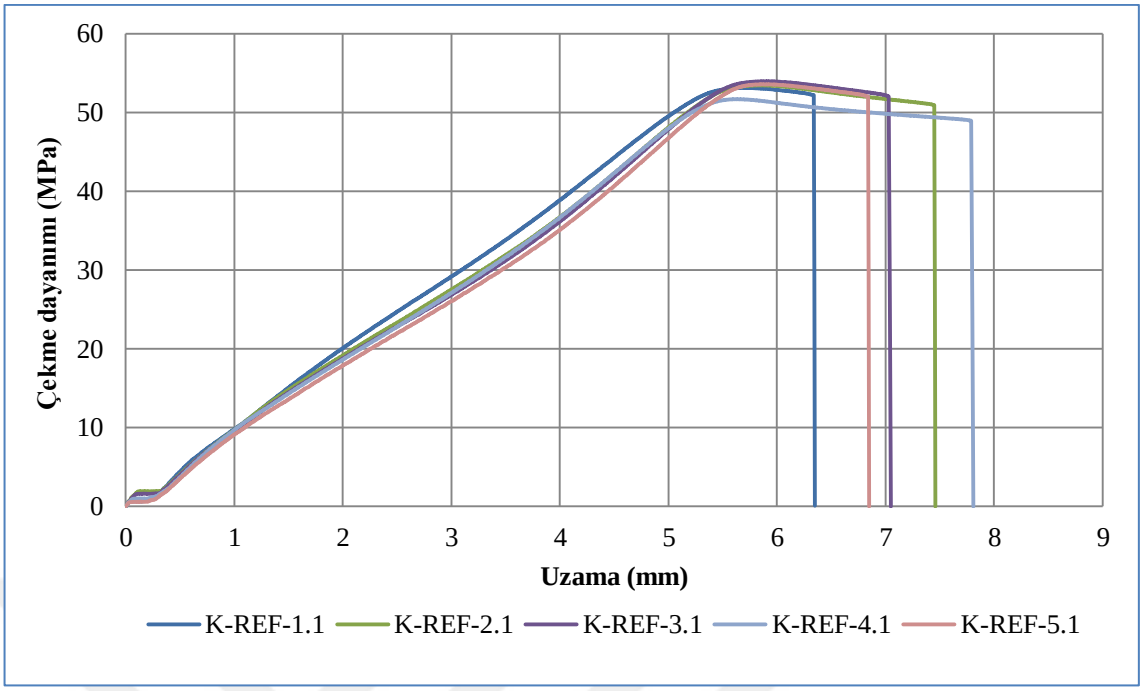


Şekil 5.14. 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

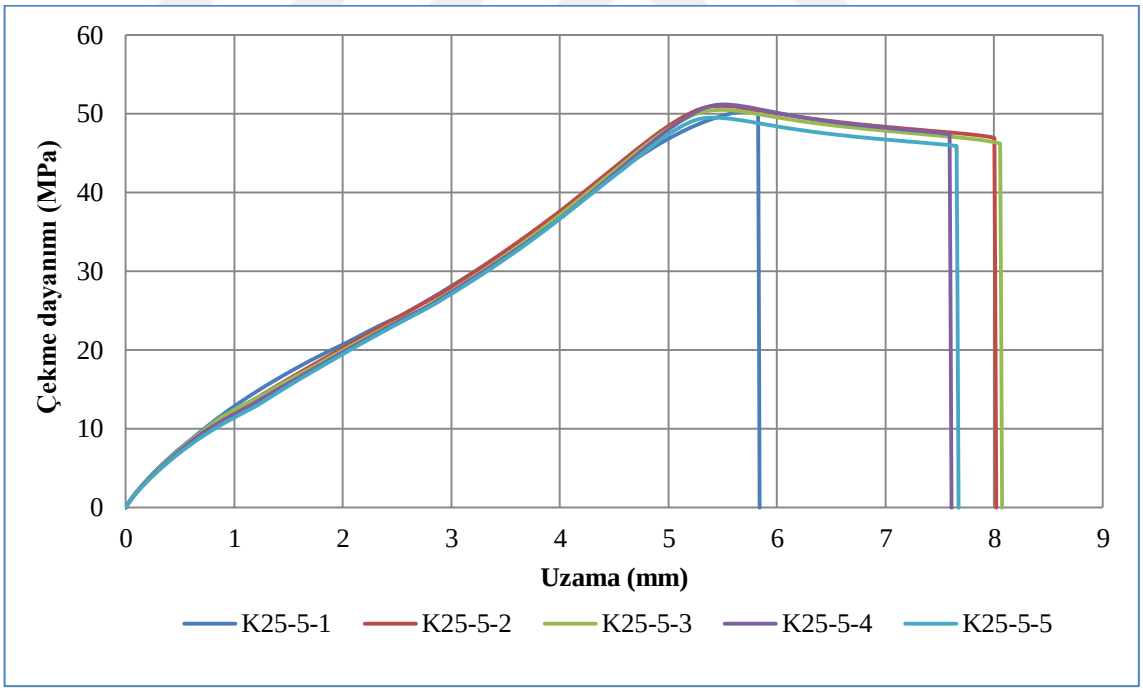
Şekil 5.13 ile verilen referans kemik numuneye ve Şekil 5.14 ile verilen 25 °C su içerisinde bekletilmiş filamentten basılan kemik numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3. ve 4. görüntülerde numunenin kırılma yüzeyleri, 5. ve 6. görüntülerde numune içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Referans numunede ve numune içindeki filamentte kırılma daha yumuşak, sünek olarak gerçekleşirken şartlandırılmış olan numunede kırılma daha keskin, gevrek olarak gerçekleşmiştir. Şartlandırılmış numuneye ait fotoğrafta da görüldüğü üzere kırılma tek hat üzerinde oluşmuş numunede sünek malzemelerde kırılma esnasında meydana gelen herhangi bir boyun verme veya şekil değişimi olmamıştır. Aynı kırılma durumları 5. ve 6. görüntülerdeki filament yüzeylerinde de görülmektedir. Referans numuneye ait filamentte uzamış iplik formundaki PLA'lar var iken şartlandırılmış filamentte keskin kırılmış yüzeyler vardır. Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 5.7, 5.9) kırılma durumlarını desteklemektedir.

Şekil 5.13'teki 1. ve 2. görüntüler referans kemik numunenin yüzeylerini, Şekil 5.14'teki 1. ve 2. görüntüler ise 25 °C su içerisinde bekletilmiş filamentten basılan kemik numunenin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde şartlandırılmış numunedeki baskı kalitesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Referans numune yüzeylerinde baskı esnasında filamentler arasında boşluk yoktur ve filamentler birbirine yapışmıştır fakat şartlandırılmış numunede filamentler arasında boşluk oluşmuş filamentler birbirine tam olarak yapışmamıştır. Bu da baskı ve yüzey kalitesinin bozulmasına, çekme dayanımının azalmasına neden olmuştur.

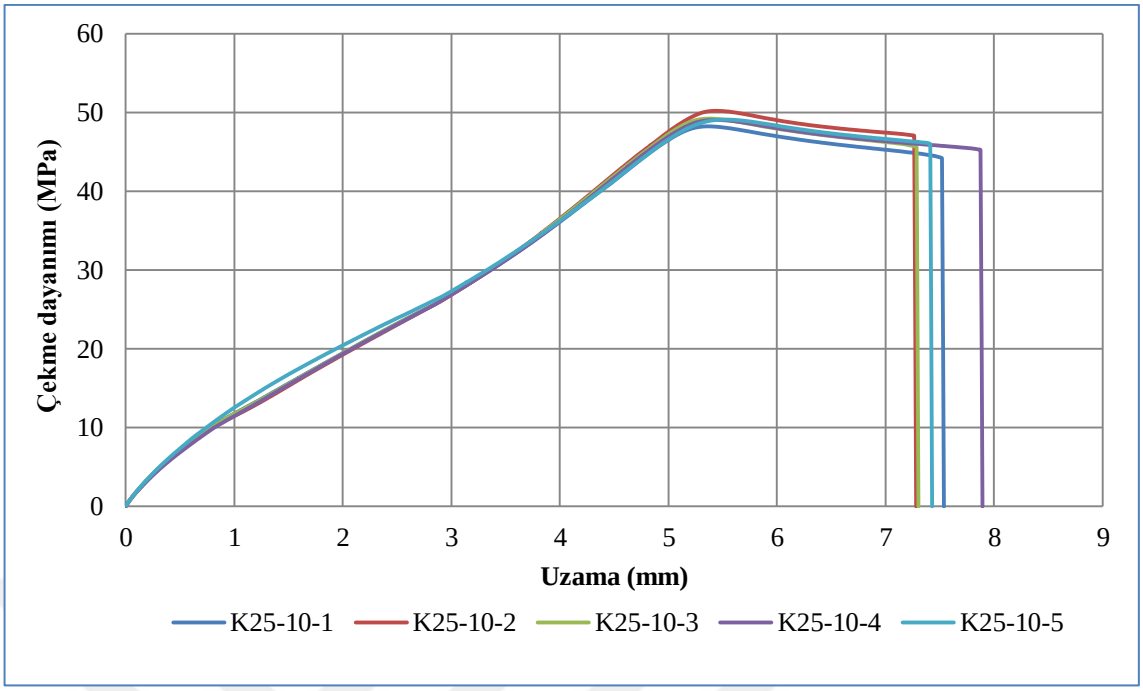
PLA kemik numuneleri 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Kemik numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.15-5.19'da verilmiştir.



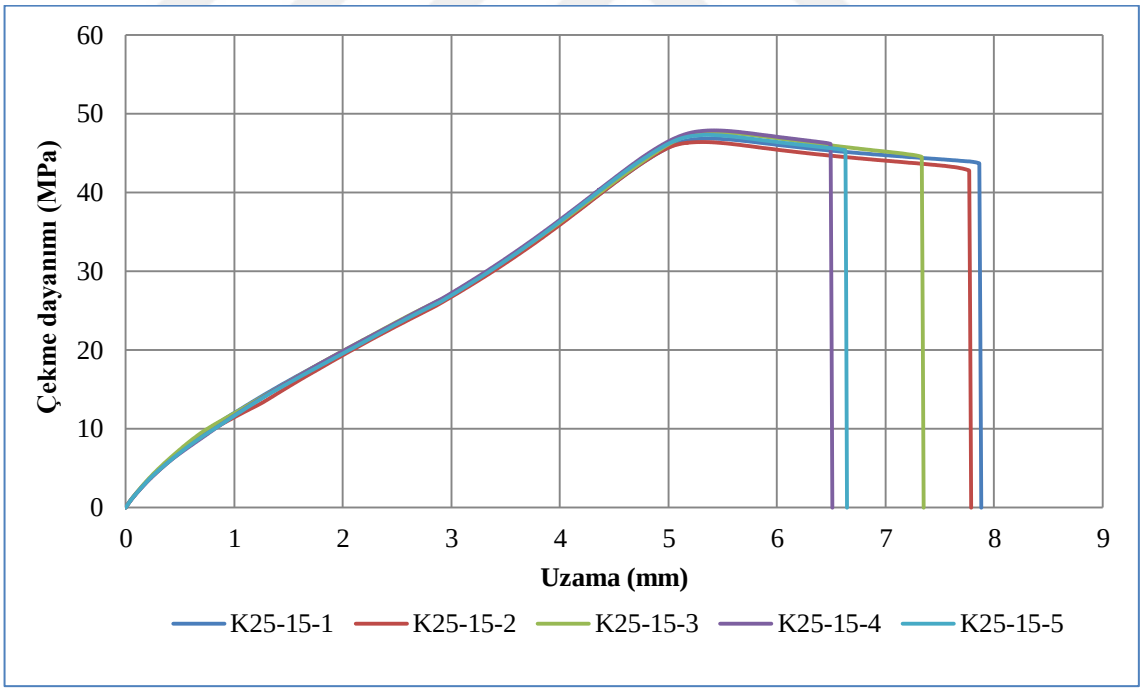
Şekil 5.15. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



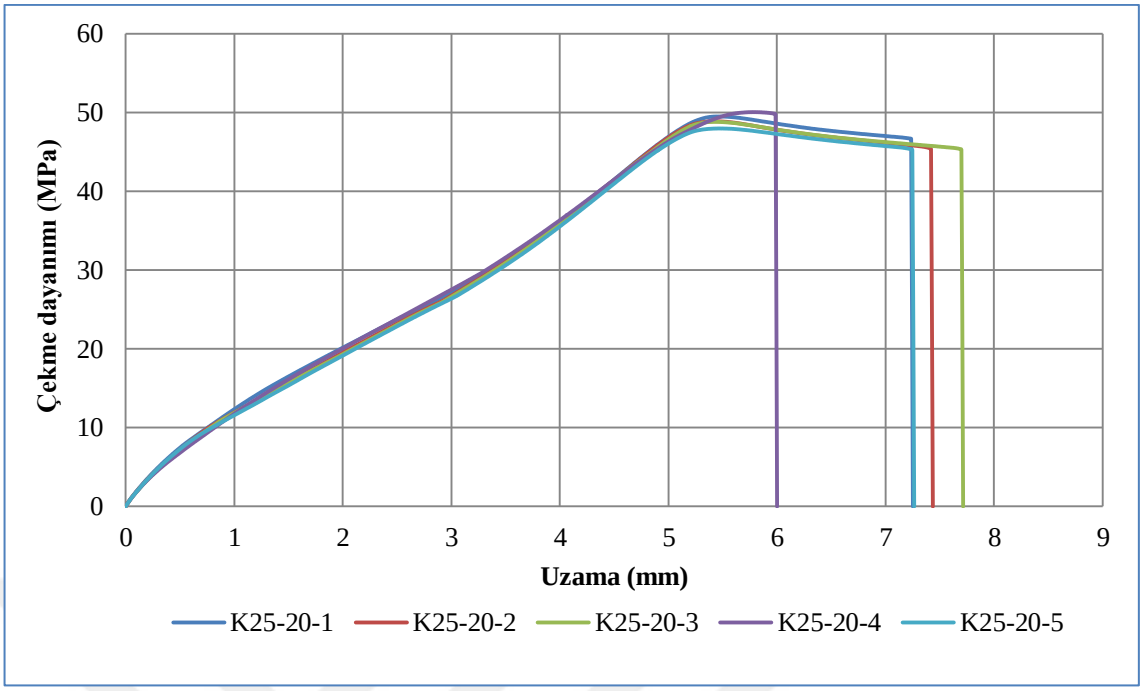
Şekil 5.16. 25 °C sıcaklıktaki suda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.17. 25 °C sıcaklıktaki suda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



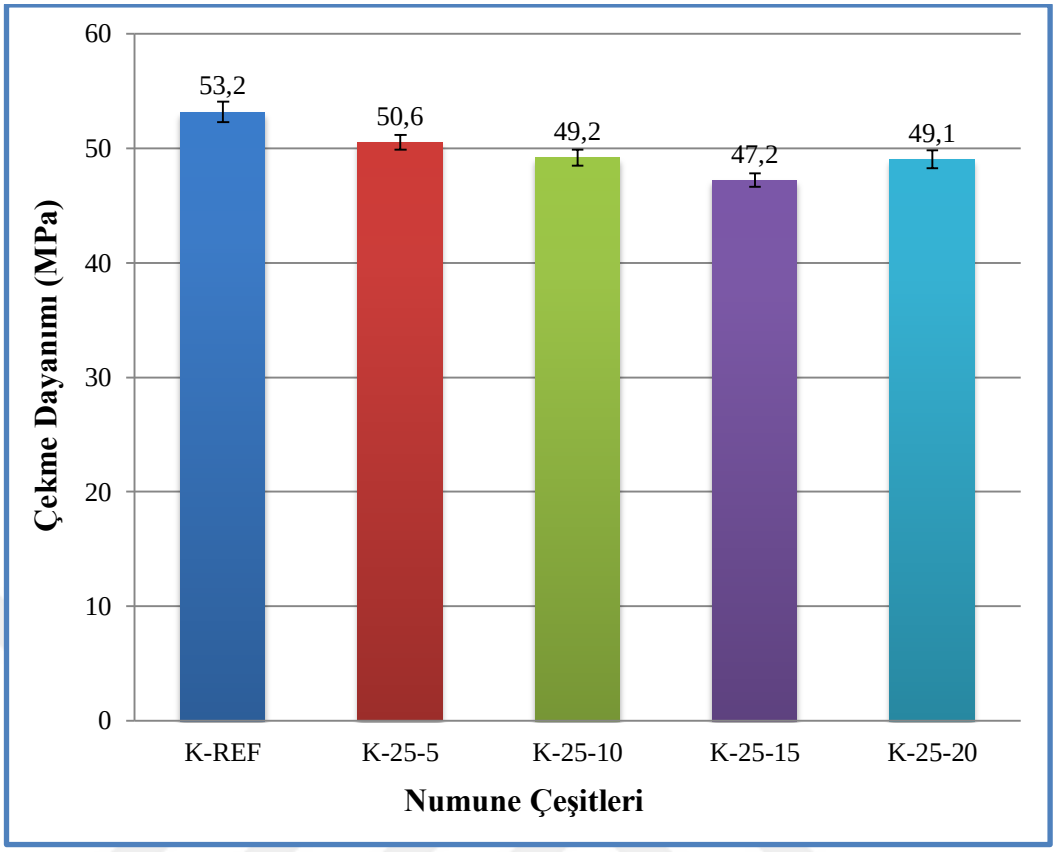
Şekil 5.18. 25 °C sıcaklıktaki suda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



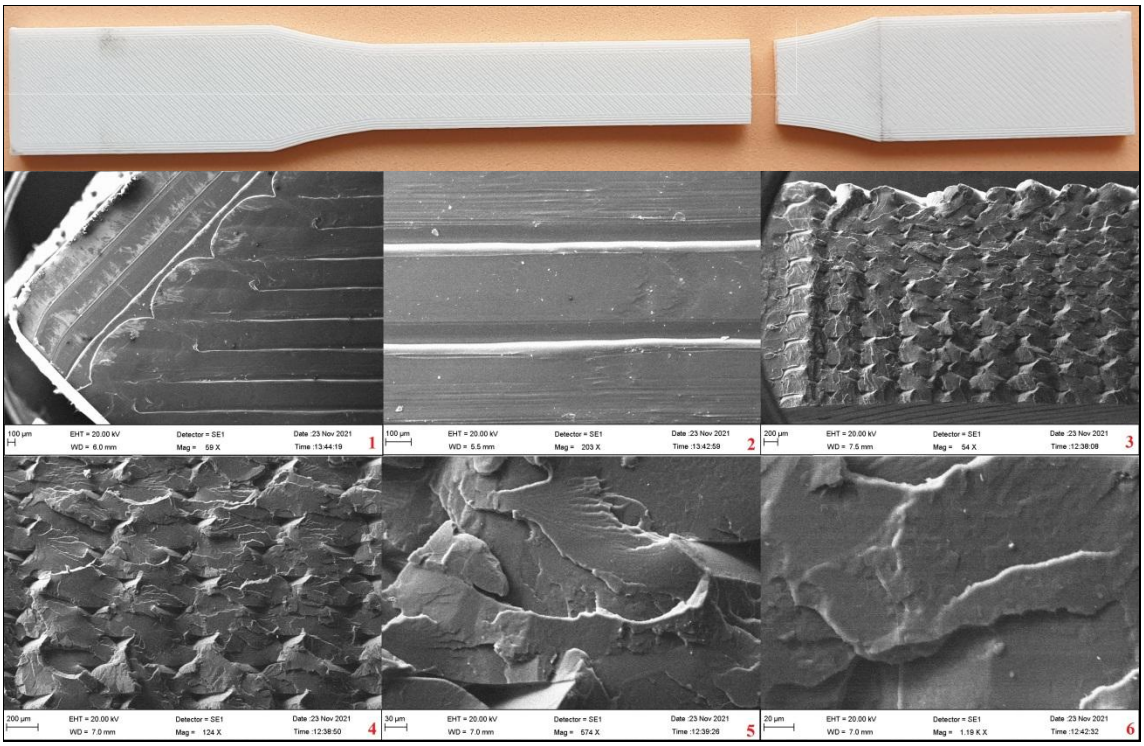
Şekil 5.19. 25 °C sıcaklıktaki suda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.

Şekil 5.15-5.19 arasında referans ve şartlandırılmış kemik numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri gösterilmektedir. Referans numuneye (Şekil 5.15) ve şartlandırılmış numunelere (Şekil 5.16-5.19) ait eğriler incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş belirli bir uzama gösterip kopmuşlardır. Bu da malzemelerin sünek olduğunu göstermektedir. Kemik numunelerin 25 °C sıcaklıktaki suda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmuştur.

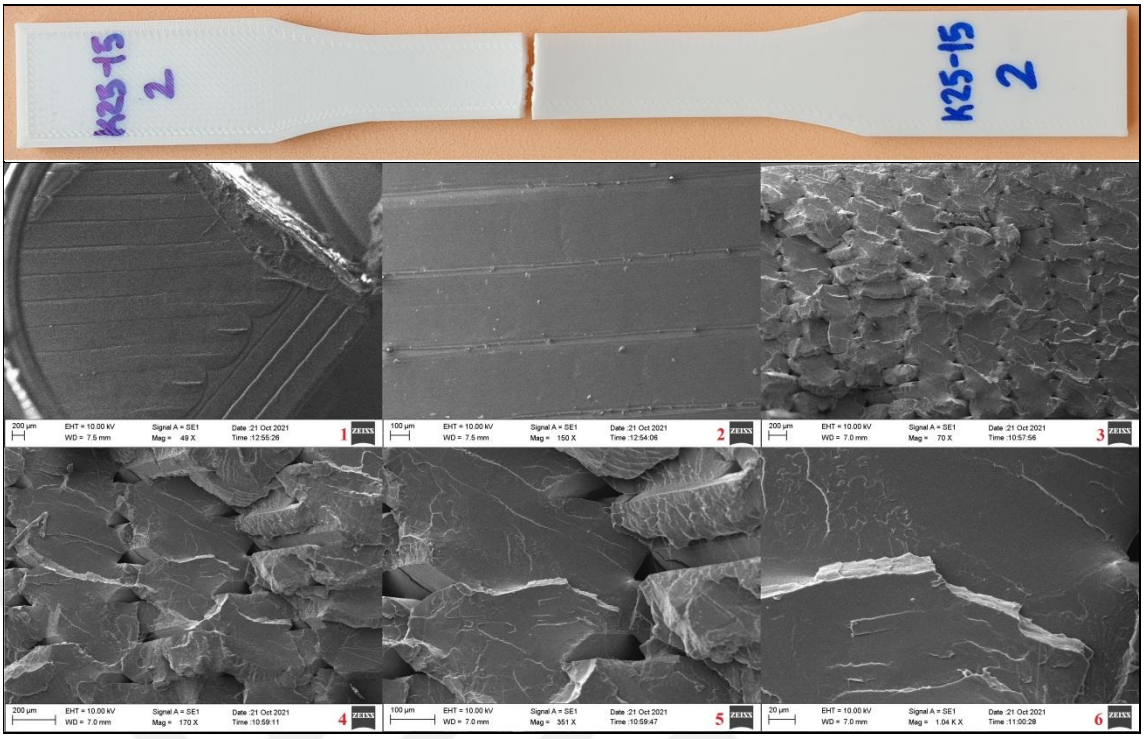
25 °C sıcaklıktaki suda bekletilmiş kemik numunelere ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 5.20) incelediğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde 15 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Su içerisinde 5, 10, 15 gün bekletme süresi ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. 20 günlük bekletme süresinde ise çekme dayanımı 15 günlük numuneye nazaran artış göstermiştir. Fakat bu durumda da 20 günlük numunenin çekme dayanımı referans numuneden daha azdır. 15 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %11.3 oranında daha düşüktür.



Şekil 5.20. Referans ve 25 °C su içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.21. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.



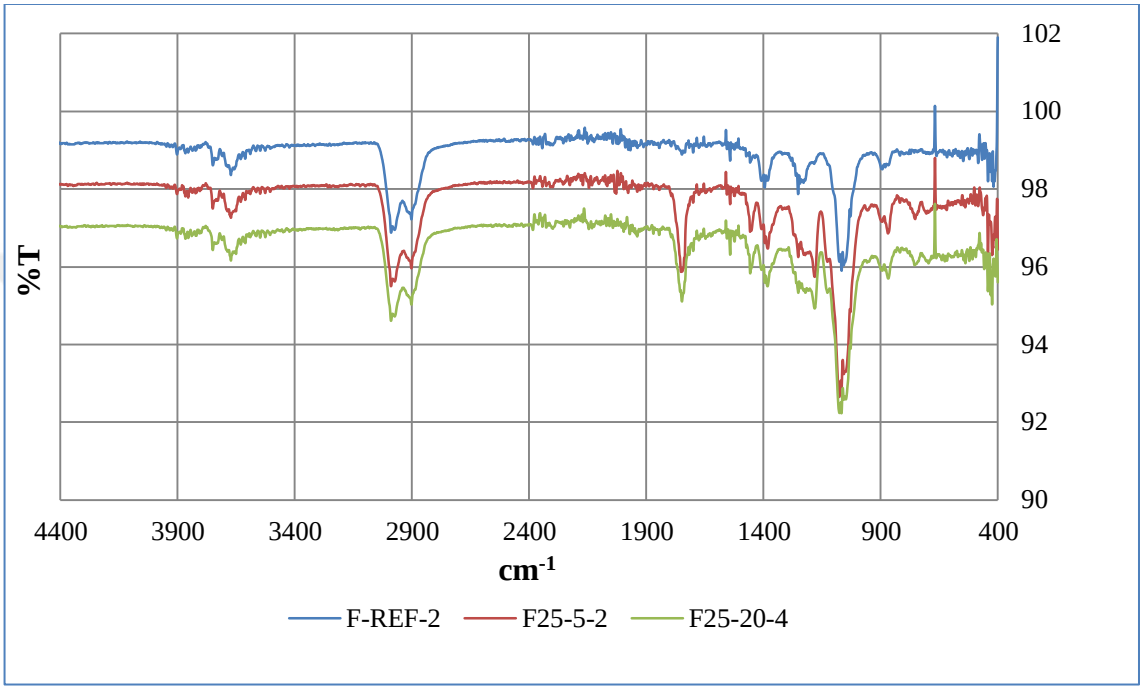
Şekil 5.22. 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 5.21 ile verilen referans kemik numuneye ve Şekil 5.22 ile verilen 25 °C su içerisinde bekletilmiş kemik numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3. ve 4. görüntülerde numunenin kırılma yüzeyleri, 5. ve 6. görüntülerde numune içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Hem referans numune hem de şartlandırılmış numunede kırılma sünek olarak gerçekleşmiştir. Her iki numuneye ait 5. ve 6. görüntülerdeki filament yüzeylerindeki kırılma yüzey durumları da benzerdir. Referans numune de şartlandırılmış numune de kırılma bölgesinde şekil değiştirmişlerdir. Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 5.15, 5.18) bu sünek kırılma durumunu desteklemektedir.

Şekil 5.21'deki 1. ve 2. görüntüler referans kemik numunenin yüzeylerini, Şekil 5.22'deki 1. ve 2. görüntüler ise 25 °C su içerisinde bekletilmiş kemik numunenin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde şartlandırmanın yüzey kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

5.1.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

PLA filamenti 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde bekletmenin etkisinin incelenmesi için belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.23).



Şekil 5.23. Referans ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filament numunelerin FTIR analizleri.

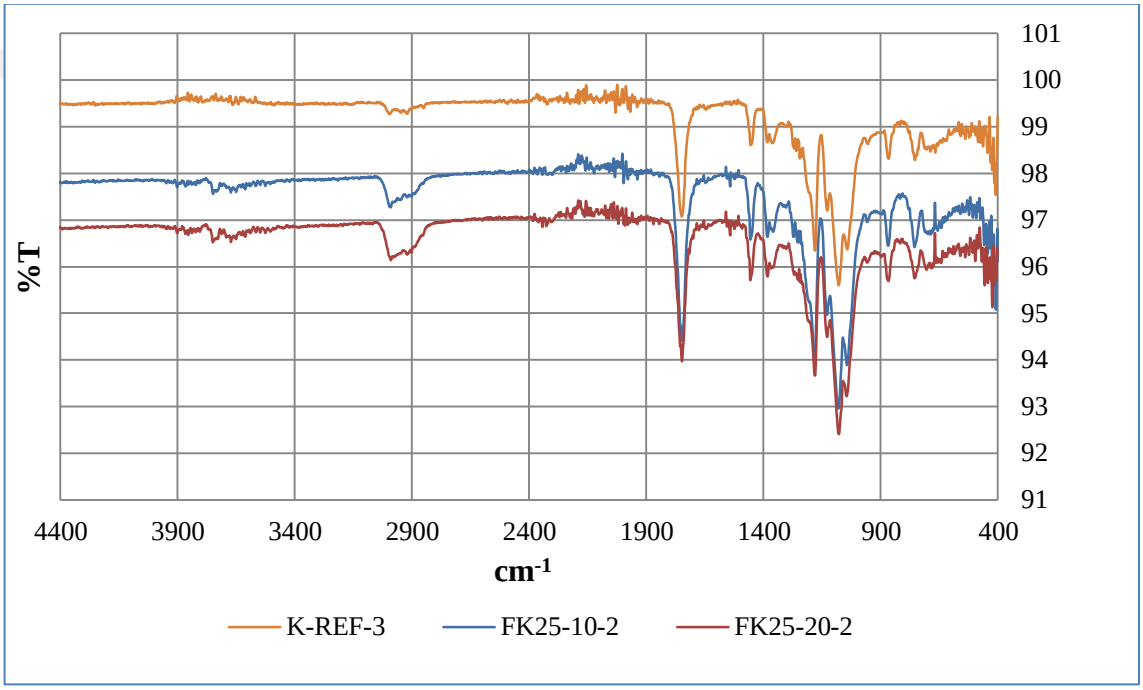
PLA referans ve şartlandırılmış filamentlerinin FTIR spektrumu, Şekil 5.23'te görülmektedir. 3000–2800 cm^{-1}, 1750 cm^{-1} ve 1250–1000 cm^{-1}'de bulunan C–H, C=O ve C–O–C gruplarından poli(laktik asit) için karakteristik bantları görülmektedir (Przekop vd., 2020).

PLA'nın kimyasal bağ yapısı temel olarak altı farklı IR bandına sahiptir (Domenek & Ducruet, 2016). Şekil 5.23'teki spektrumda bu tipik bantlar gözlemlenebilmektedir. PLA referans filament numunesinin; C-C gerilme bandı 895 cm^{-1}'de; C-O gerilme bandları 1066 cm^{-1} ve 1250 cm^{-1}'de; C-H bandı 1395 cm^{-1}'de ve C-H gerilme pikleri 2902 cm^{-1} ve 2988 cm^{-1}'de görülmektedir.

Hızlandırılmış yaşlandırma testleri, PLA'nın sadece şişmesine ve plastikleşmesine değil, aynı zamanda "hidroliz" olarak adlandırılan önemli düzeyde

kimyasal bozunma reaksiyonuna yol açar. Hidrolizler sırasında PLA yapısındaki özellikle OC=O ester bağlarının parçalandığı bilinmektedir (Shinzawa vd., 2012). 25 °C suda bekletilmiş PLA filament numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3751 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.23).

Şartlandırılmış PLA filamentten üretilen kemikleri 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde bekletmenin etkisinin incelenmesi için filamentler belirtilen ortamda belirtilen süreler ile şartlandırılmış ve daha sonra üretilen belirli kemik numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.24).

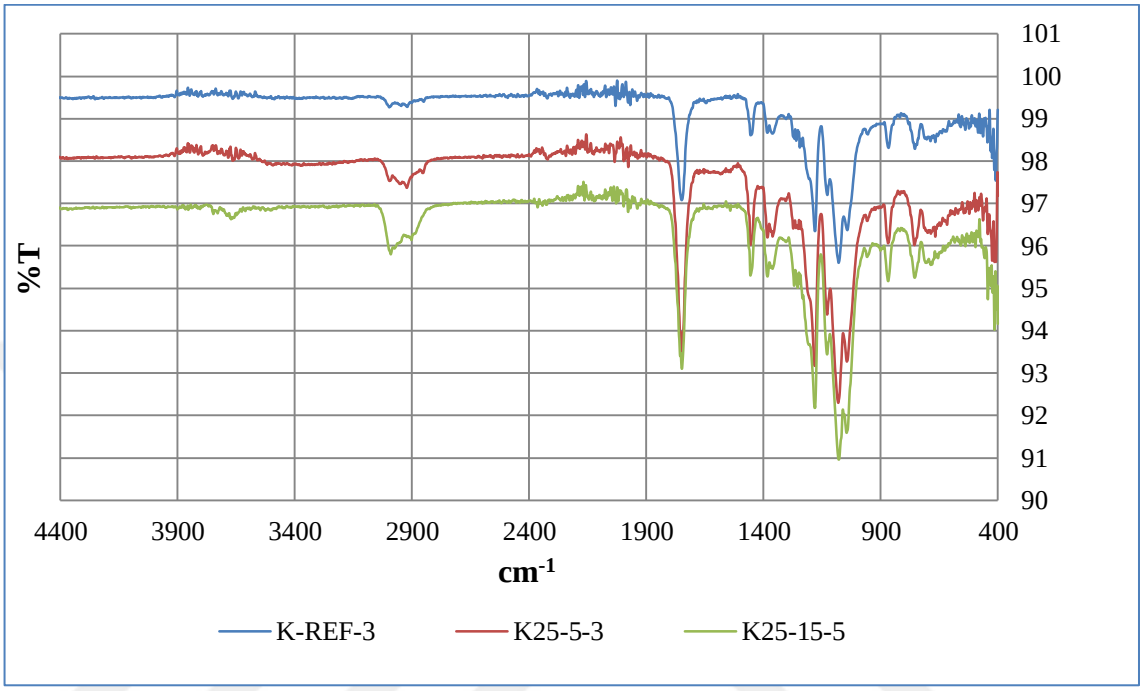


Şekil 5.24. Referans ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filamentten üretilen kemik numunelerin FTIR analizleri.

Şekil 5.24'teki spektrumda PLA'ya ait tipik bantlar görülebilmektedir. PLA referans kemik numunesinin; C-C gerilme bandı 866 cm^{-1}'de; C-O gerilme bandları 1078 cm^{-1} ve 1180 cm^{-1}'de; C-H bandı 1361 cm^{-1}'de; CH_3 bükülme absorpsiyon bandı 1453 cm^{-1}; C=O ester karbonil gerilme grupları 1748 cm^{-1}'de; ve C-H gerilme pikleri 2919 cm^{-1} ve 2997 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.24).

25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filamentten üretilen kemik numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3750 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.24).

PLA kemik numuneleri 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde bekletmenin etkisinin incelenmesi için belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.25).



Şekil 5.25. Referans ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA kemik numunelerin FTIR analizleri.

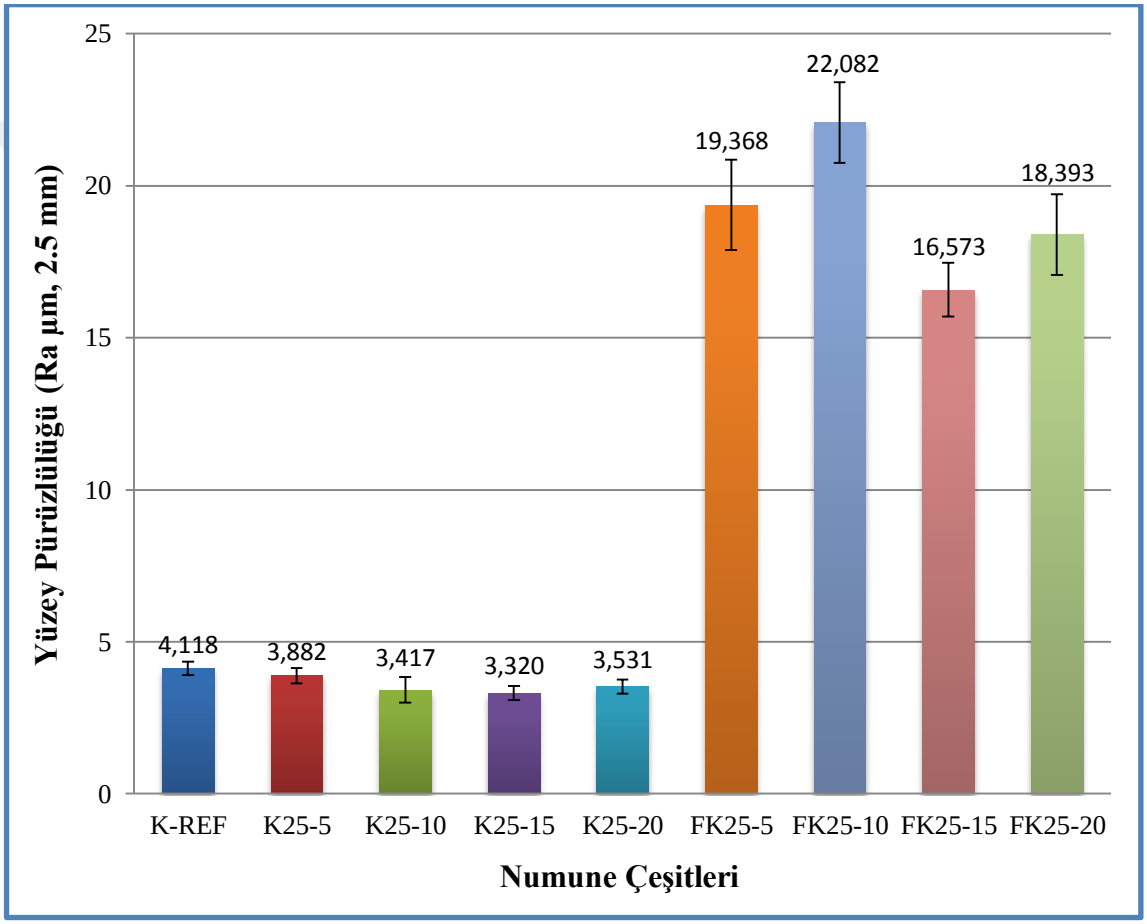
Şekil 5.25'teki spektrumda PLA'ya ait tipik bantlar görülebilmektedir. PLA referans kemik numunesinin; C-C gerilme bandı 866 cm^{-1}'de; C-O gerilme bandları 1078 cm^{-1} ve 1180 cm^{-1}'de; C-H bandı 1361 cm^{-1}'de; CH_3 bükülme absorpsiyon bandı 1453 cm^{-1}; C=O ester karbonil gerilme grupları 1748 cm^{-1}'de; ve C-H gerilme pikleri 2919 cm^{-1} ve 2997 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.25).

25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA kemik numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3676 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.25).

5.1.3. Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi

Referans, PLA filamentten basılan ve 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde bekletilen kemik numunelerin yüzey pürüzlülüklerine ait değerler Şekil 5.26'daki grafik ile verilmiştir.

Şekil 5.26'daki grafikte görüldüğü gibi 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde bekletilen kemik numunelerin referans numuneye göre yüzey pürüzlülükleri bekletme süresi ile doğru orantılı olarak azalmıştır yani yüzeyler daha pürüzsüz hale gelmiştir. Fakat 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde bekletilen filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülükleri referans numuneye göre oldukça artmıştır, yüzeyler daha pürüzlü hale gelmiştir. Bunun sebebi yazdırma esnasında oluşan ve numune dayanımının da düşmesine neden olan baskı problemleridir. Yüzey pürüzlülüklerindeki bu artışın nedeni SEM yüzey görüntülerinde de açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.14).



Şekil 5.26. Referans, 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA kemik ve 25 °C su içerisinde bekletilmiş PLA filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

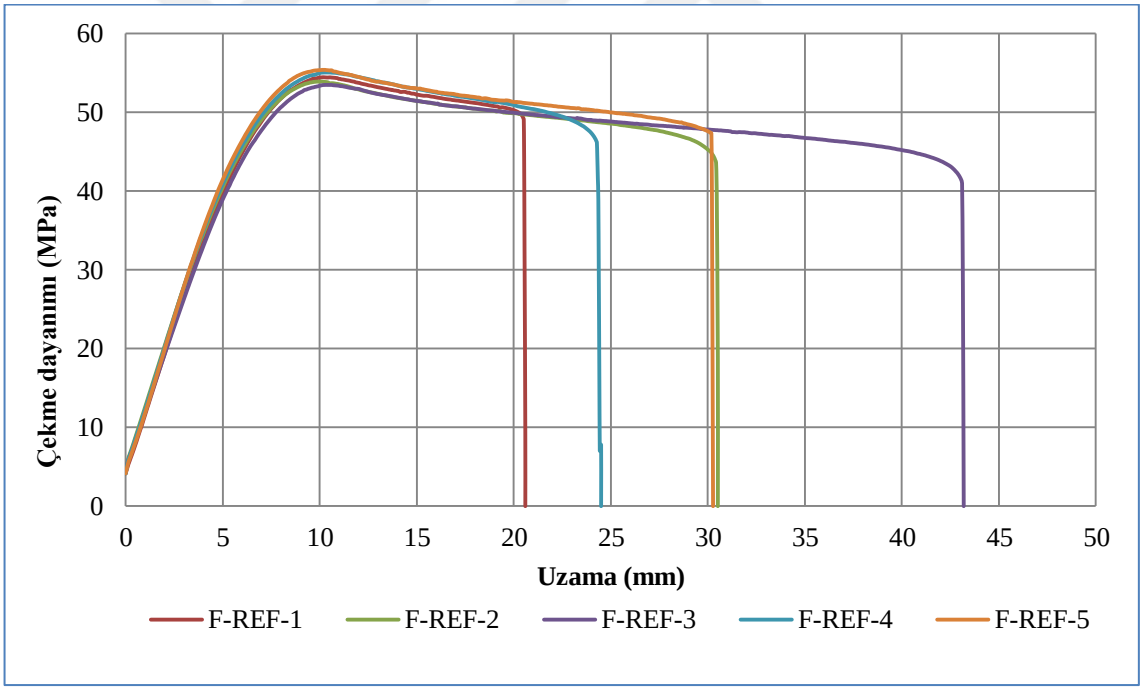
5.2. 25 °C Sıcaklık ve %80 Bağıl Nemli Ortam İçerisinde Şartlandırılan PLA Numunelerin Mekanik ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Değerlendirilmesi

Şartlandırılan PLA numunelerdeki değişimlerin değerlendirilebilmesi için filament numuneler 25±0.5 °C sıcaklık ve %80±2 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmişlerdir. Daha sonra şartlandırılmış olan filamentlerden

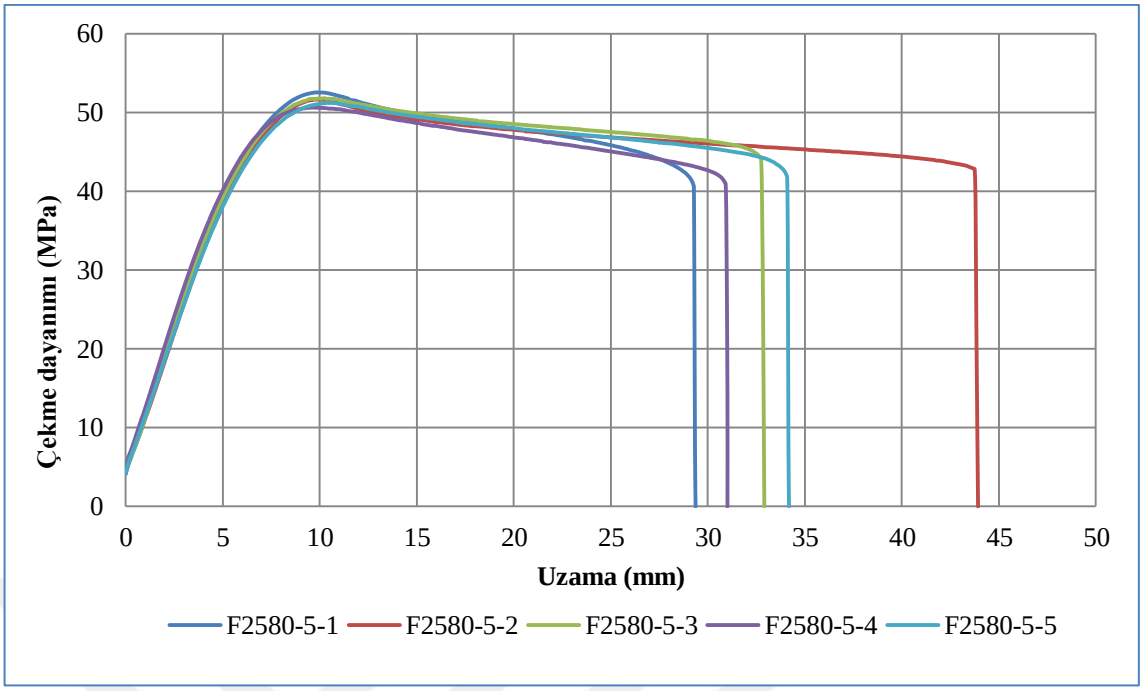
kemik numuneler üretilmiş ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Şartlandırılmamış (referans) ve şartlandırılmış filament, şartlandırılmış filamentlerden üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmış, çekme deneyi sonrası belirli kemik numunelerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri alınarak incelenmiş, kırılan numuneler fotoğraflanmış ve numunede oluşabilecek kimyasal veya fiziksel değişimlerin değerlendirilebilmesi amacı ile belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır.

5.2.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

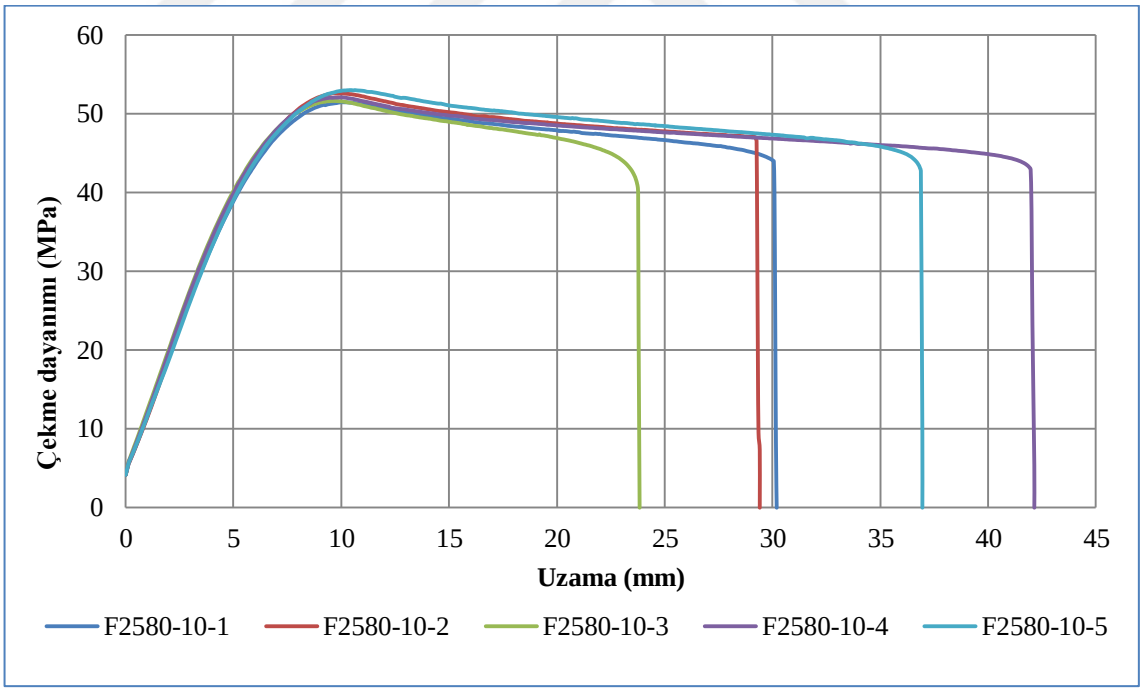
PLA filamenti 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Filament numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.27-5.31'de verilmiştir.



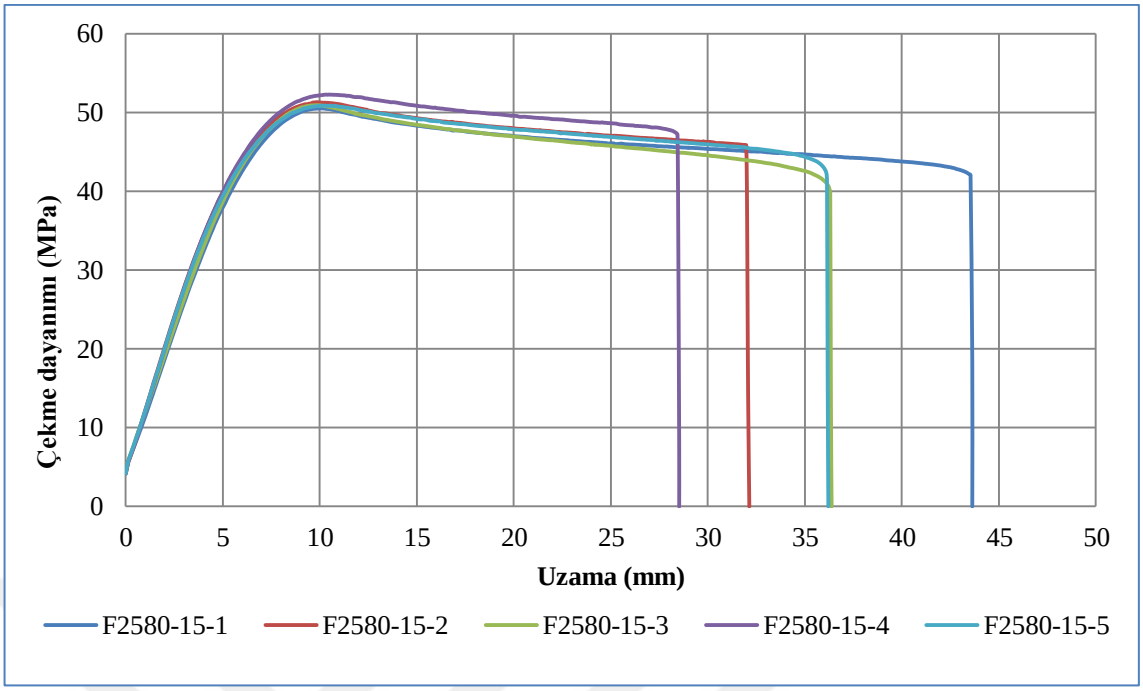
Şekil 5.27. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filament numunelerin çekme dayanımları.



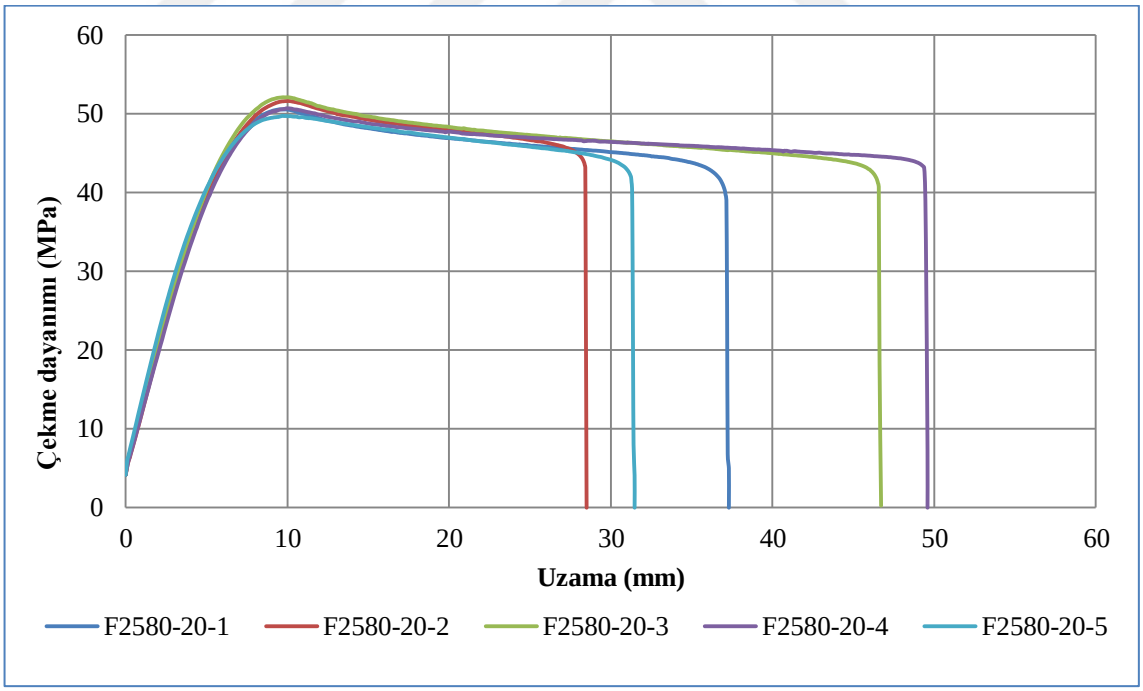
Şekil 5.28. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.29. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.30. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

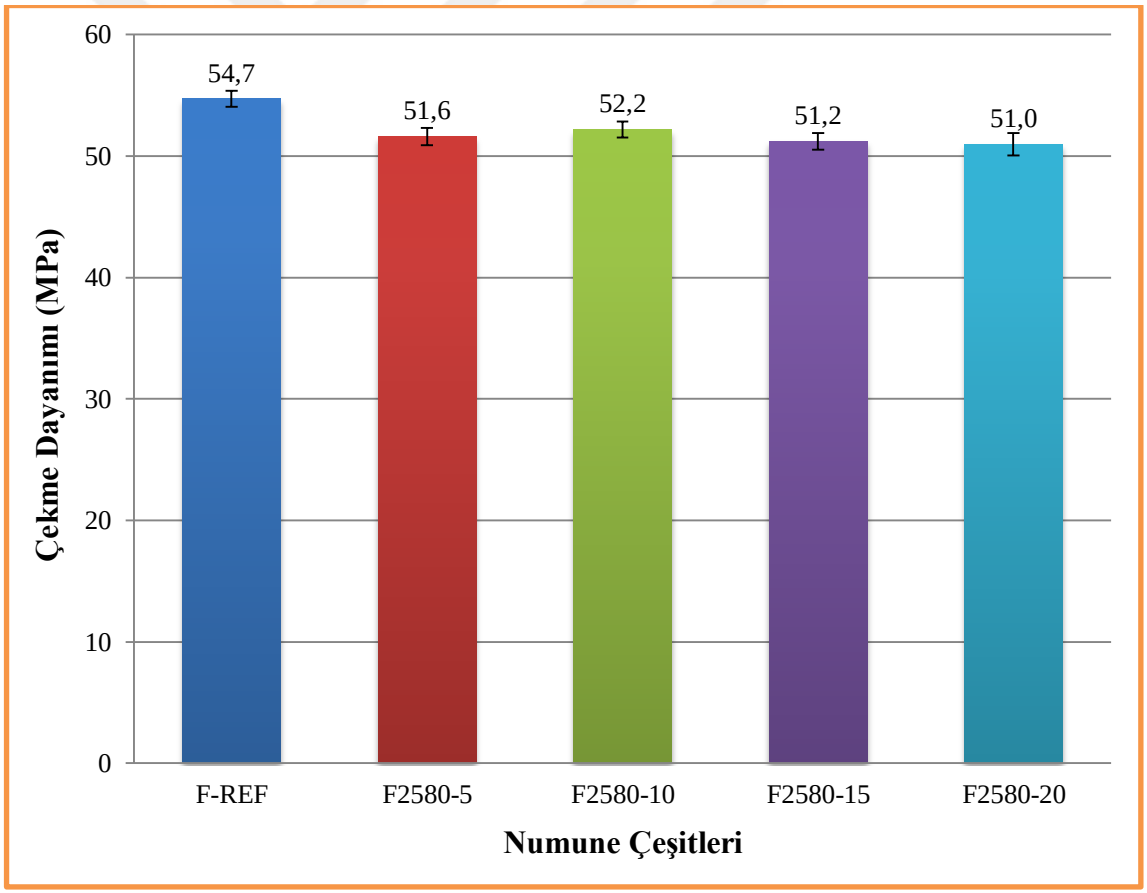


Şekil 5.31. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

Şekil 5.27-5.31 arasındaki filament numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri incelendiğinde referans ve şartlandırılmış tüm numuneler maksimum çekme

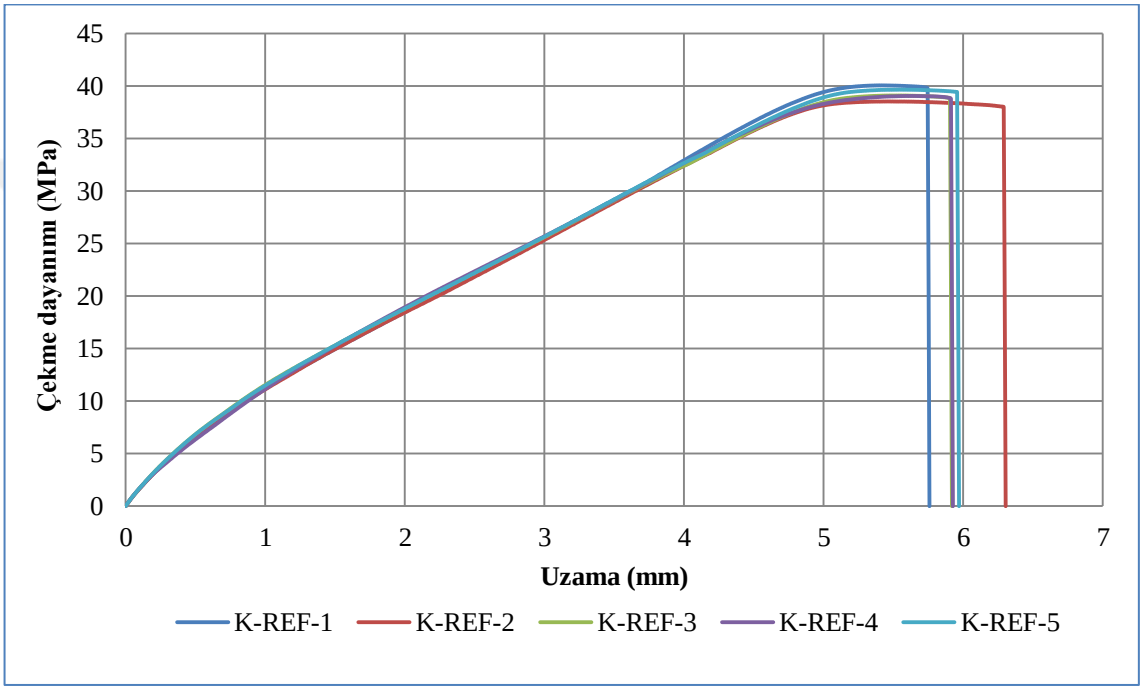
dayanımı noktasında boyun vermişler belirli bir uzama gösterip kopmuşlardır. Bu da malzemelerin sünek olduğunu göstermektedir. Numunelerin 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde olumlu veya olumsuz yönde önemli bir etkisi olmamıştır.

Filament numunelere ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 5.32) incelediğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Nemli ortamda bekletme süresinin artması ile numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. Çekme dayanımlarındaki azalma tüm sürelerde neredeyse birbirine yakındır. Yani numune 5 gün bekletme süresinde de 20 gün bekletme süresinde de birbirine benzer dayanım kaybı yaşamıştır. Dayanımın değişmesinde süre önemli bir etken olmamıştır. 20 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %6.8 oranında daha düşüktür.

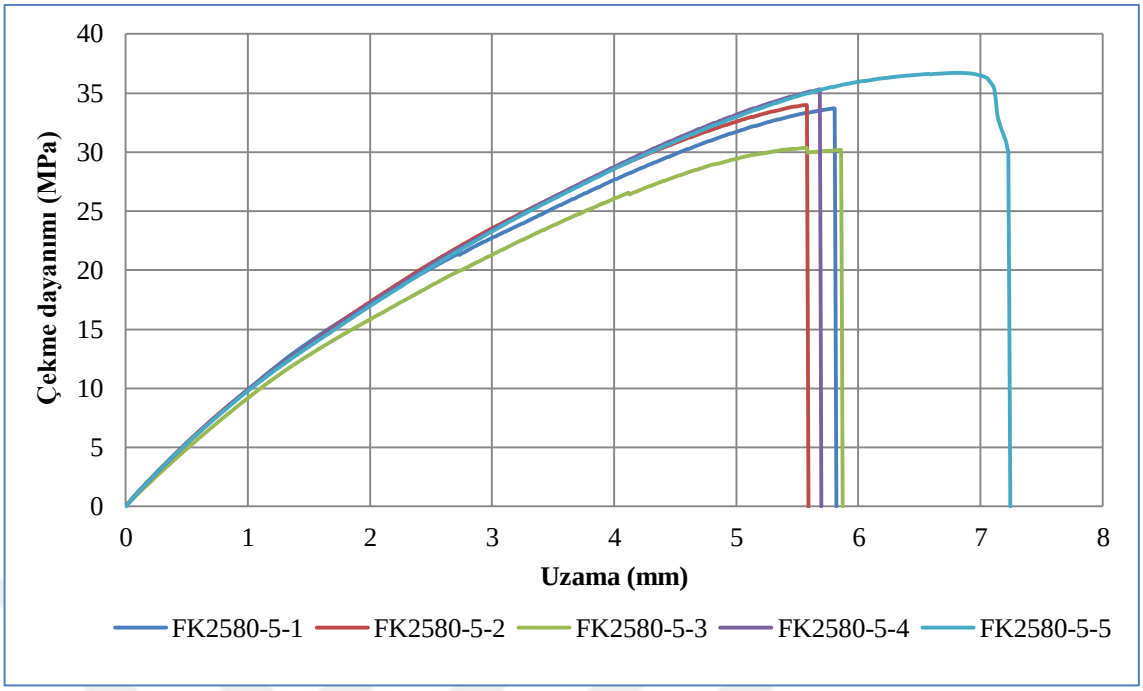


Şekil 5.32. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

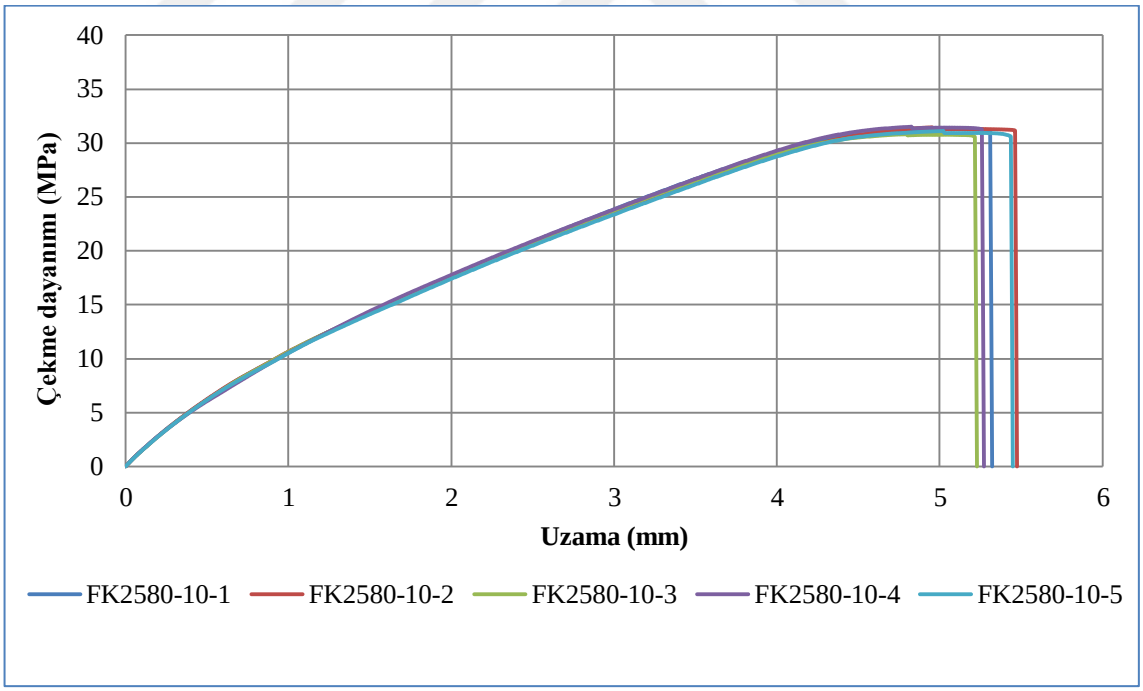
Şartlandırılmış PLA filamentten üretilen kemiklere 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için filamentler belirtilen ortamda belirtilen süreler ile şartlandırılmış ve daha sonra üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Şartlandırılmış filamentten üretilen kemik numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.33-5.37'de verilmiştir.



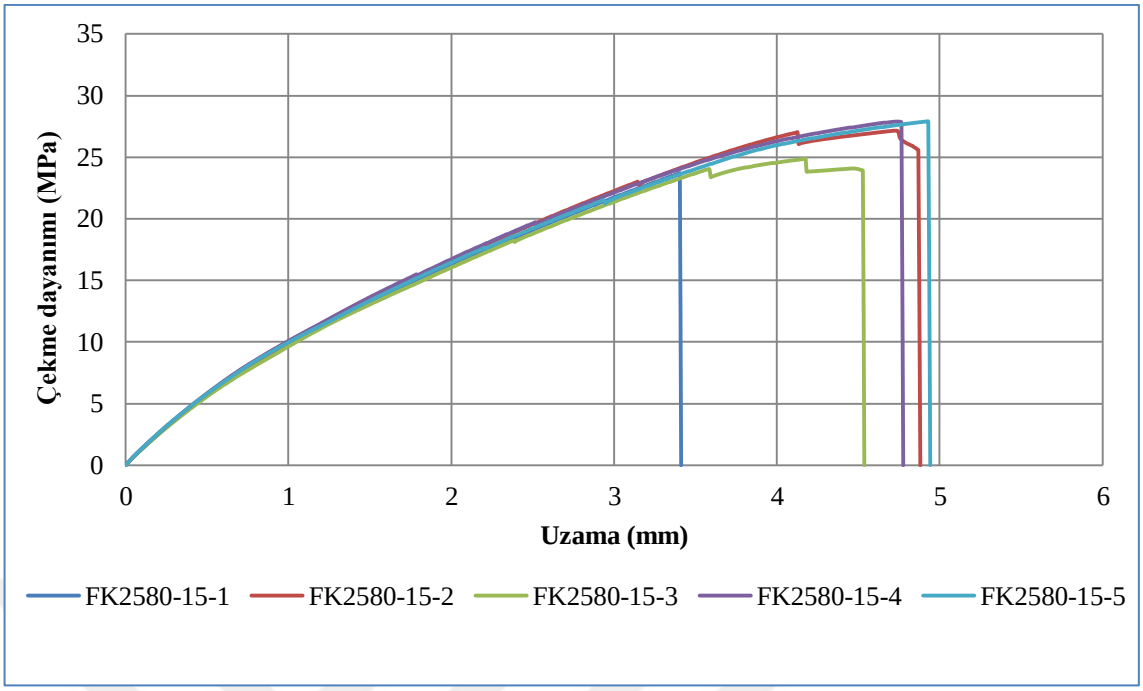
Şekil 5.33. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



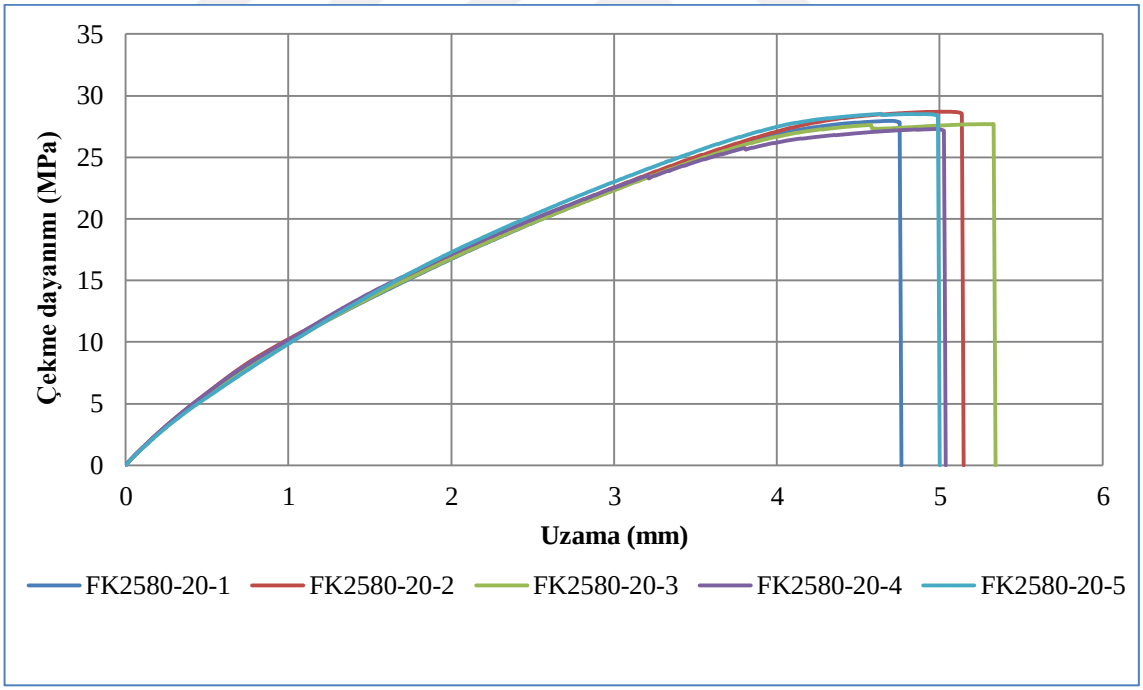
Şekil 5.34. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.35. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



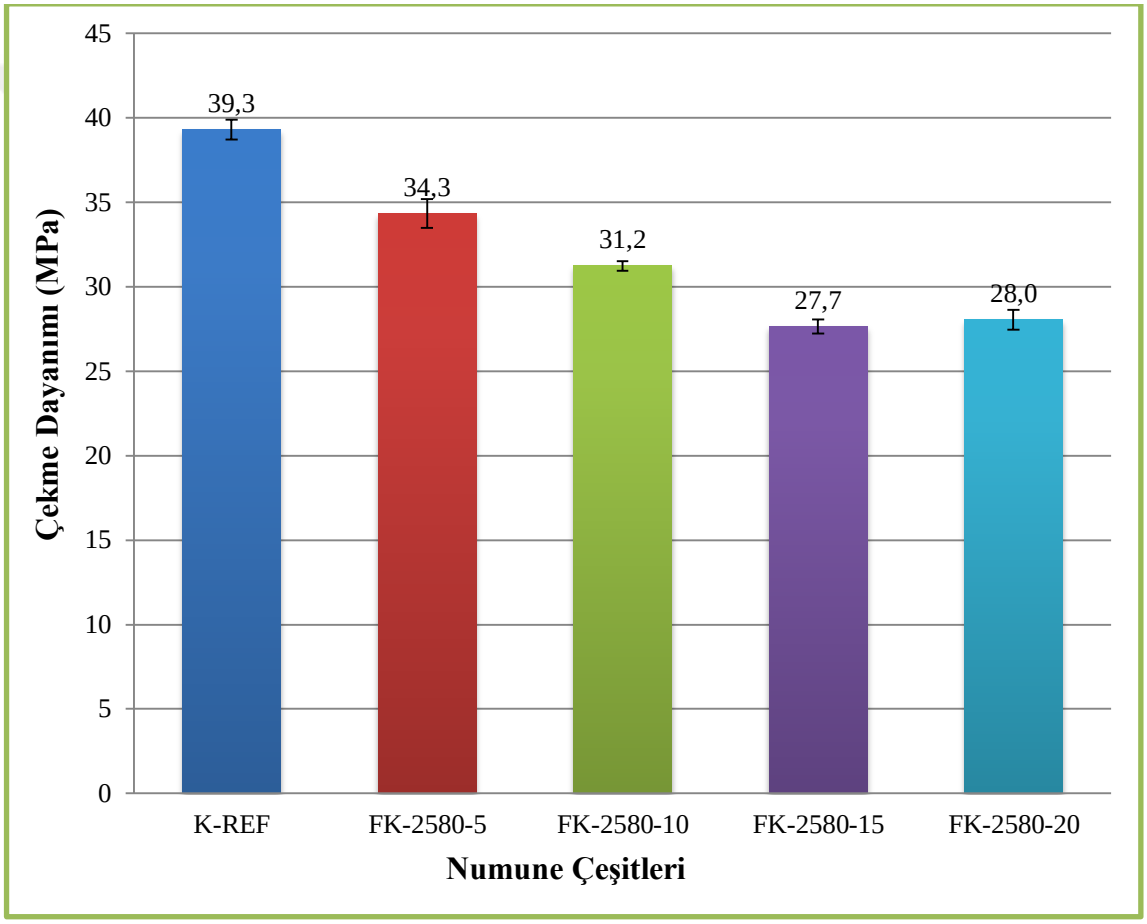
Şekil 5.36. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.37. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

Şekil 5.33-5.37 arasında referans ve şartlandırılmış filamentlerden basılan kemik numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri gösterilmektedir. Referans numuneye ait (Şekil 5.33) ve 10 gün süre ile şartlandırılmış filamentten basılan numuneye ait

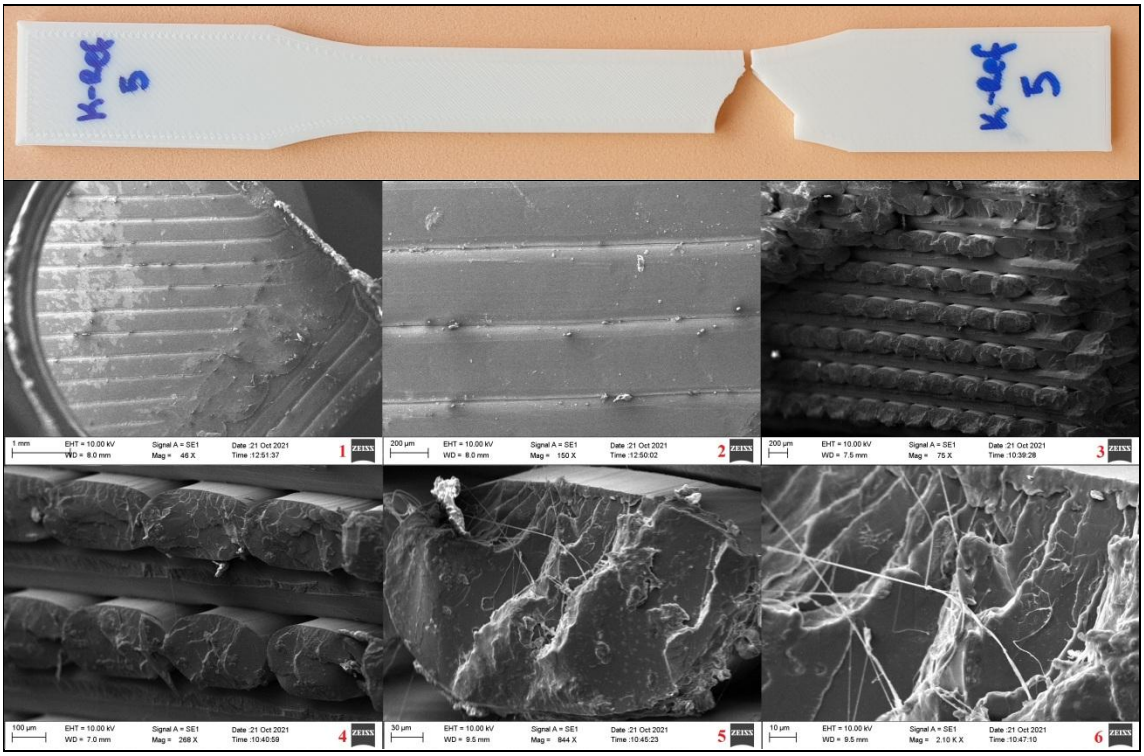
(Şekil 5.35) eğriler incelendiğinde her iki numune de maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş belirli bir uzama gösterip kopmuştur. Bu da malzemelerin yarı sünek olduğunu göstermektedir. Fakat şartlandırılmış filamentlerden basılan numunelere ait (Şekil 5.34, 5.36, 5.37) eğriler incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında kopmuşlardır. Bu da malzemenin gevrek olduğunu göstermektedir. Filamentlerin 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin yazdırılan numunelerin sünek-gevrek davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Özellikle 5, 15 ve 20 günlük numuler gevrek davranış sergilemişler ve maksimum yükte boyun vermeden kırılmışlardır.



Şekil 5.38. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş filamentlerden basılan numunelere ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 5.38) incelediğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 15 gün bekletilmiş filamentten basılan numunede elde edilmiştir. %80 bağıl nemli ortamda bekletme

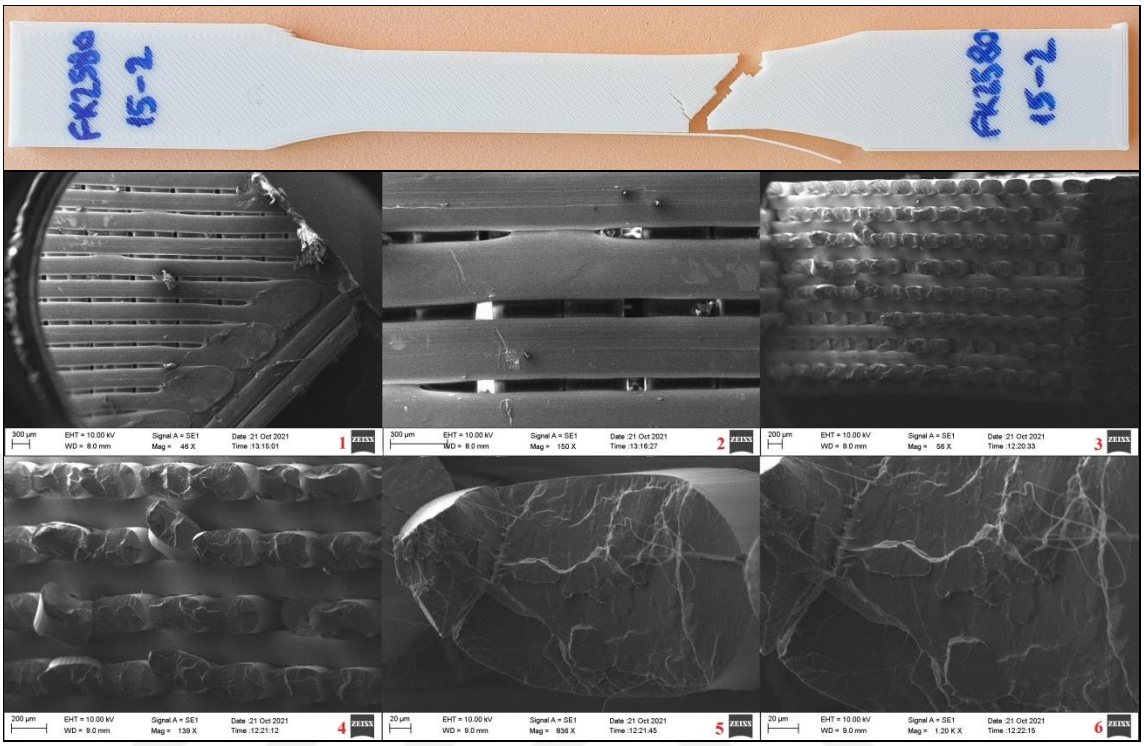
süresinin artması ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. 20 günlük numunede çekme dayanımı 15 günlük numuneye nazaran hafif artış gösterse de 15 ve 20 günlük numunelerde çekme dayanımları neredeyse eşittir. 15 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %29 oranında daha düşüktür.



Şekil 5.39. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 5.39 ile verilen referans kemik numuneye ve Şekil 5.40 ile verilen 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş filamentten basılan kemik numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3. ve 4. görüntülerde numunenin kırılma yüzeyleri, 5. ve 6. görüntülerde numune içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Referans numunede ve numune içindeki filamentte kırılma daha yumuşak, sünek olarak gerçekleşirken şartlandırılmış olan numunede kırılma daha keskin, gevrek olarak gerçekleşmiştir. Şartlandırılmış numuneye ait fotoğrafta da görüldüğü üzere kırılma tek hat üzerinde oluşmuş numunede sünek malzemelerde kırılma esnasında meydana gelen herhangi bir boyun verme veya şekil değişimi olmamıştır. Filamentlerin 5. ve 6. görüntülerdeki kırılma yüzeyleri incelendiğinde referans numuneye ait filamentte uzamış iplik formundaki PLA'lar vardır. Şartlandırılmış filamentte keskin kırılmış yüzeyler vardır. Şartlandırılmış filamentler kırılma esnasında aynı anda farklı

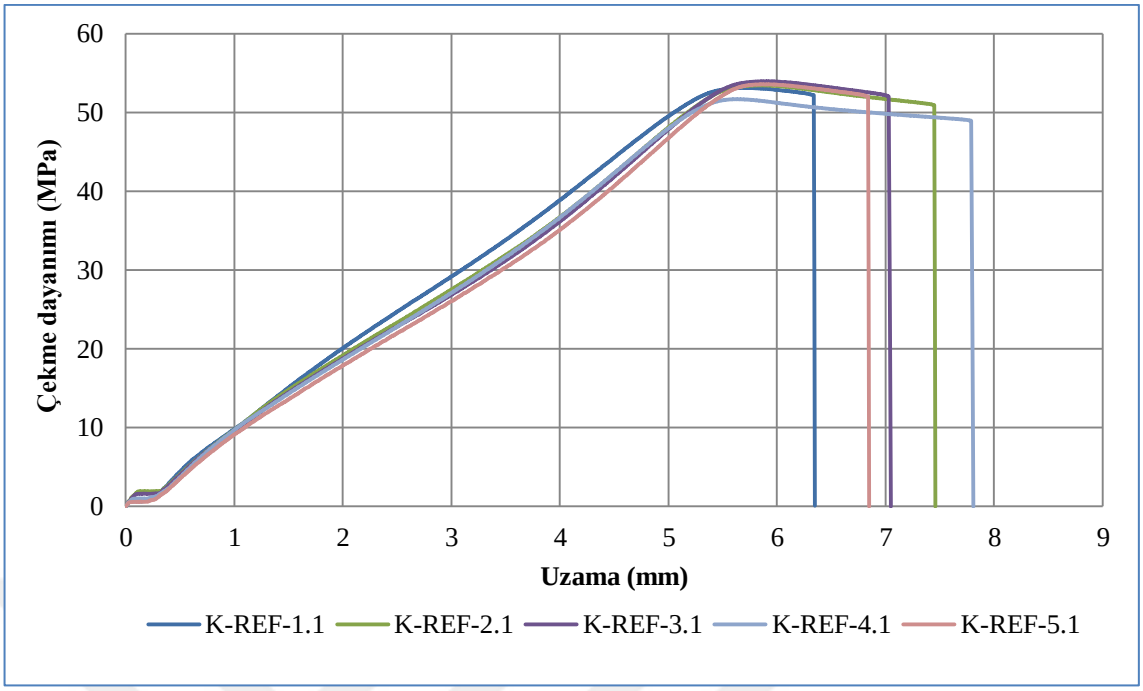
noktalardan da kırılmıştır (Şekil 5.40-4). Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 5.33, 5.36) kırılma durumlarını desteklemektedir.



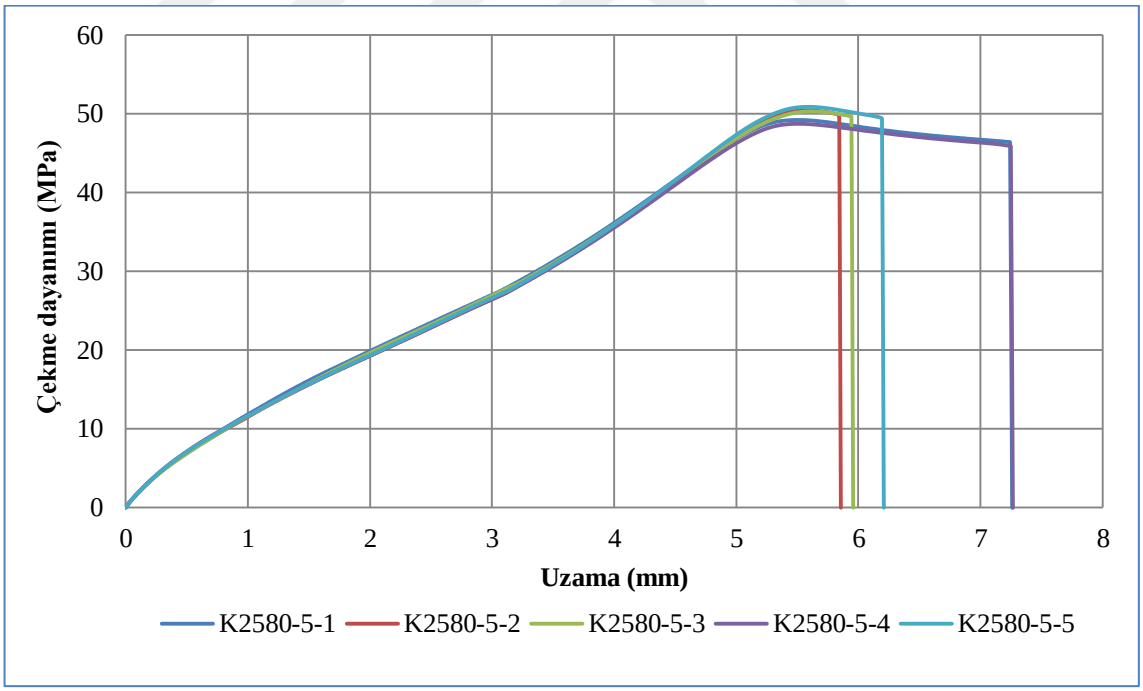
Şekil 5.40. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 5.39'daki 1. ve 2. görüntüler referans kemik numunenin yüzeylerini, Şekil 5.40'daki 1. ve 2. görüntüler ise 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş filamentten basılan kemik numunenin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde şartlandırılmış numunedeki baskı kalitesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Referans numune yüzeylerinde baskı esnasında filamentler arasında boşluk yoktur ve filamentler birbirine yapışmıştır fakat şartlandırılmış numunede filamentler arasında çok fazla boşluk oluşmuş filamentler birbirine yapışmamıştır. Bu da baskı ve yüzey kalitesinin bozulmasına ve çekme dayanımının azalmasına neden olmuştur.

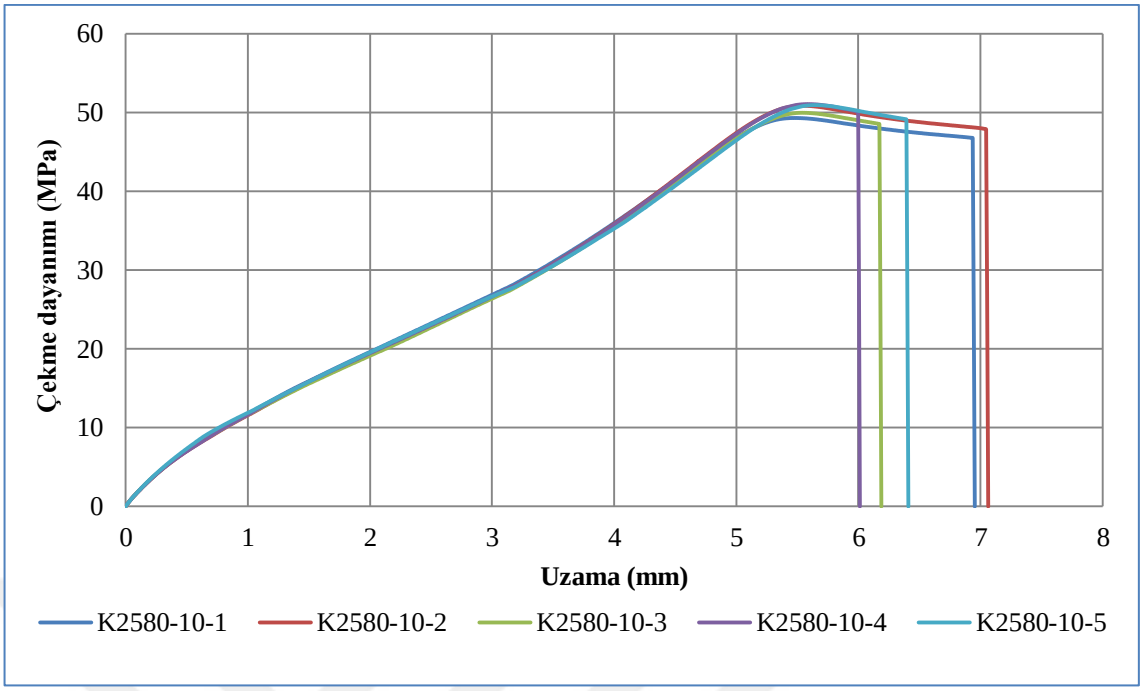
PLA kemik numuneleri 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Kemik numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.41-5.45'te verilmiştir.



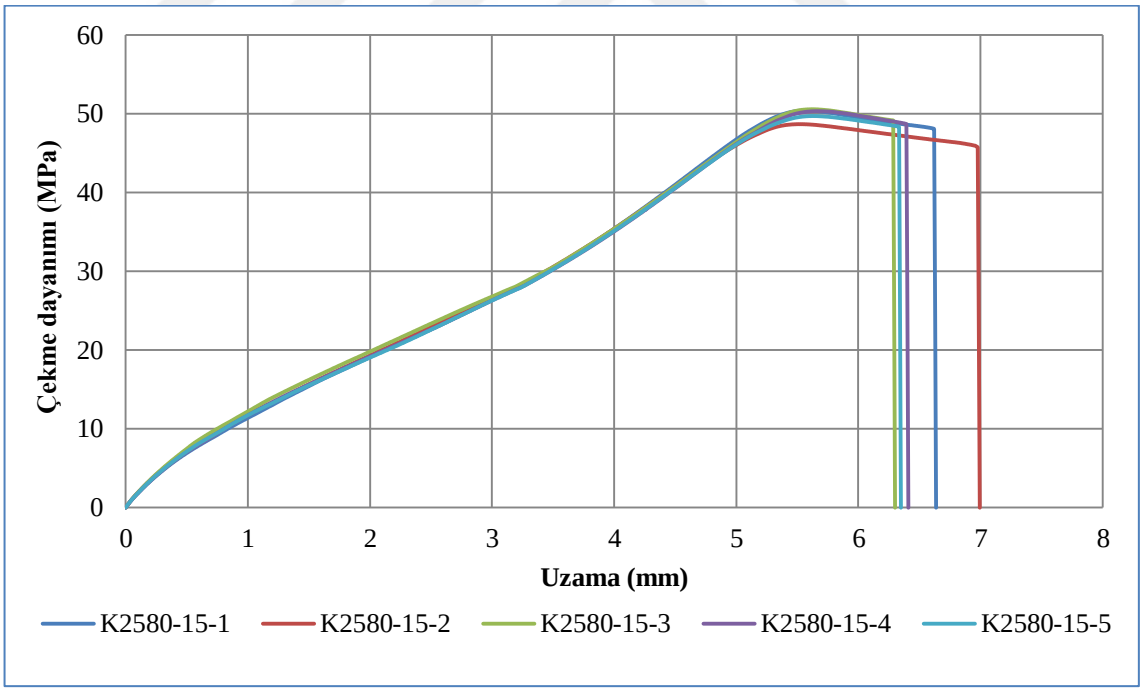
Şekil 5.41. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



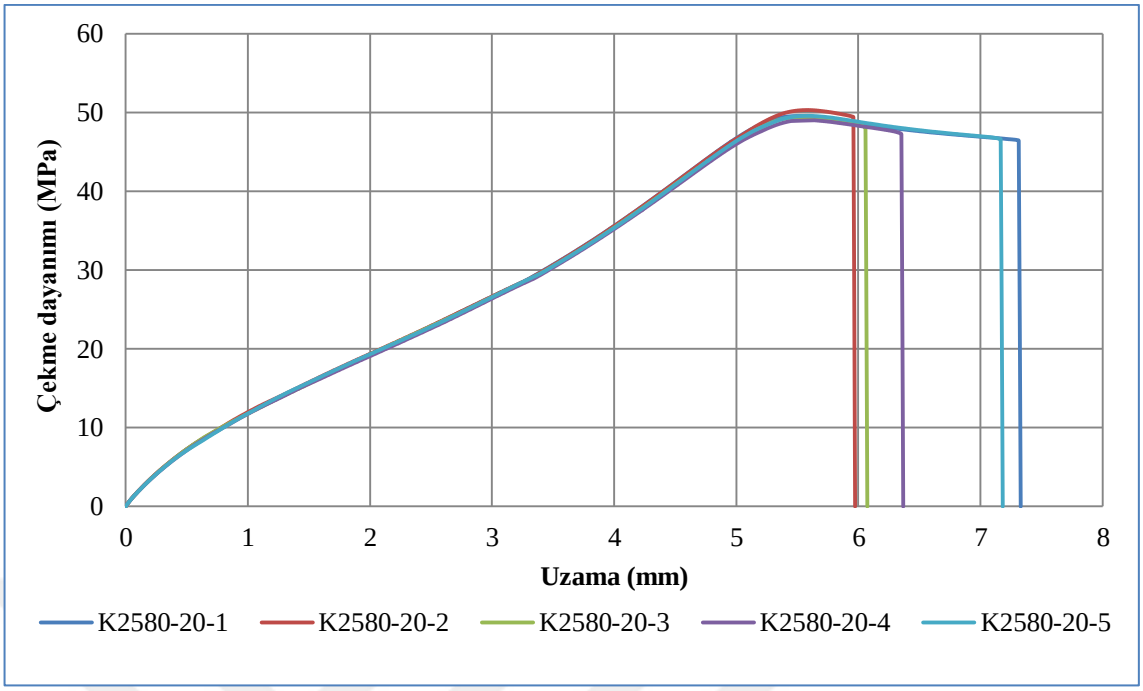
Şekil 5.42. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.43. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 10 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



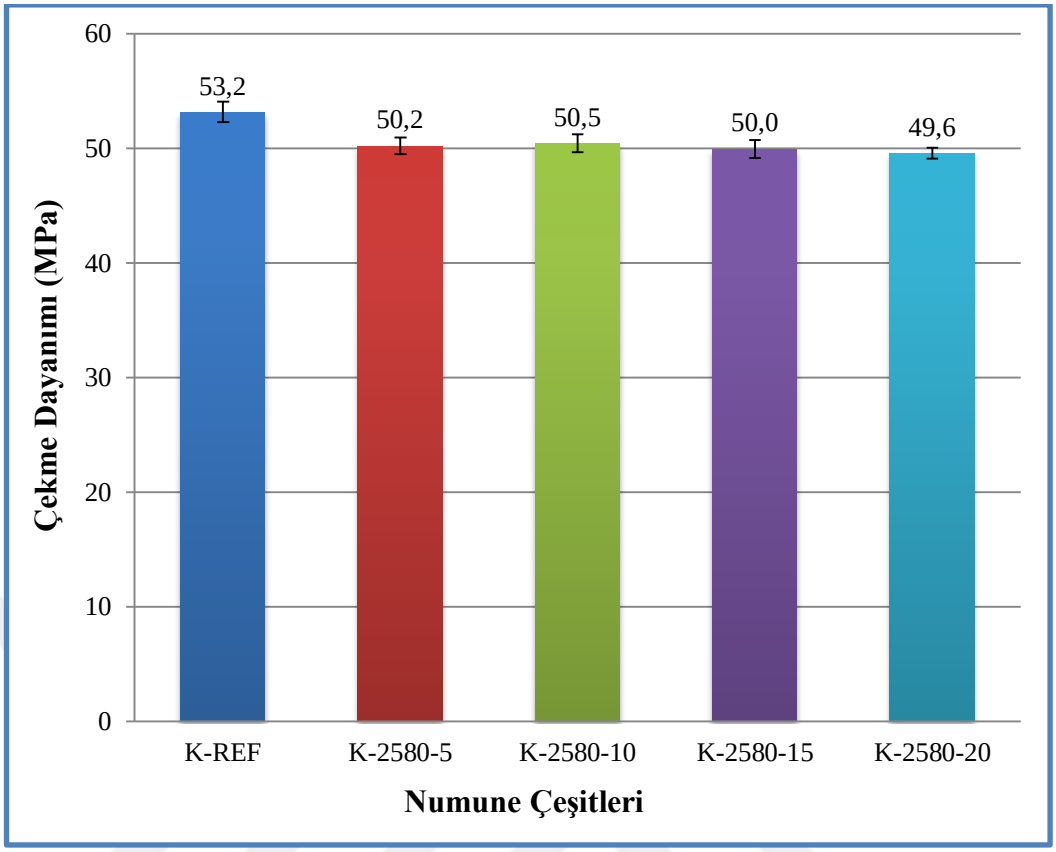
Şekil 5.44. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



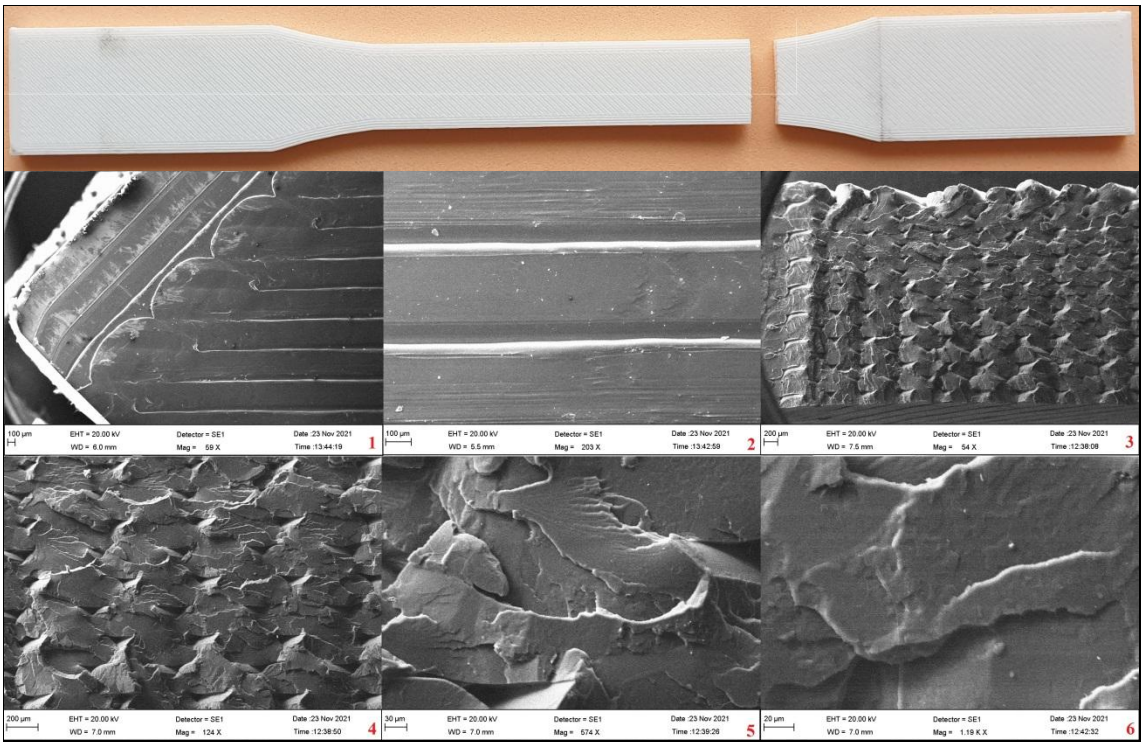
Şekil 5.45. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.

Şekil 5.41-5.45 arasında referans ve şartlandırılmış kemik numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri gösterilmektedir. Referans numuneye ait (Şekil 5.41) ve şartlandırılmış numunelere ait (Şekil 5.42-5.45) eğriler incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş belirli bir uzama gösterip kopmuşlardır. Bu da malzemenin sünek olduğunu göstermektedir. Kemik numunelerin 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

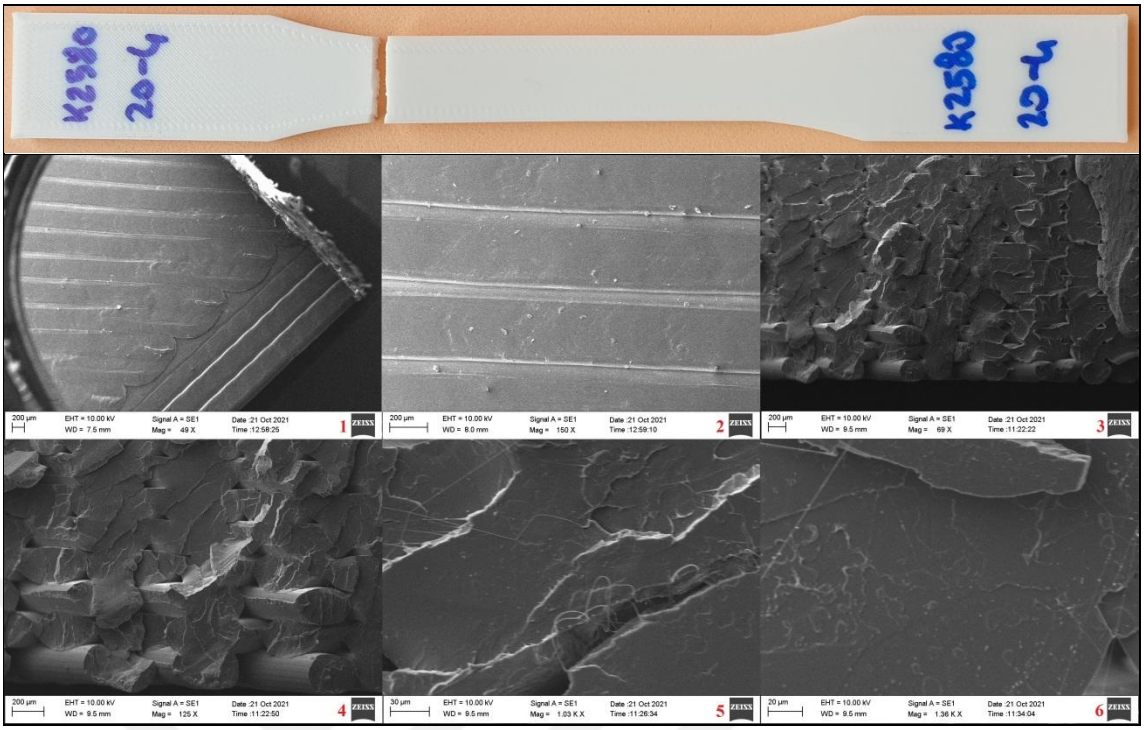
25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş kemik numunelere ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 5.46) incelediğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise %80 bağıl nemli ortamda 20 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Nemli ortamda bekletme süresinin artması ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır fakat bu azalma tüm sürelerde birbirine yakındır. Yani numune 5 gün bekletme süresinde de 20 gün bekletme süresinde de birbirine benzer dayanım kaybı yaşamıştır. Dayanımın değişmesinde süre çok önemli bir etken olmamıştır. 20 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %6.8 oranında daha düşüktür.



Şekil 5.46. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.47. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.



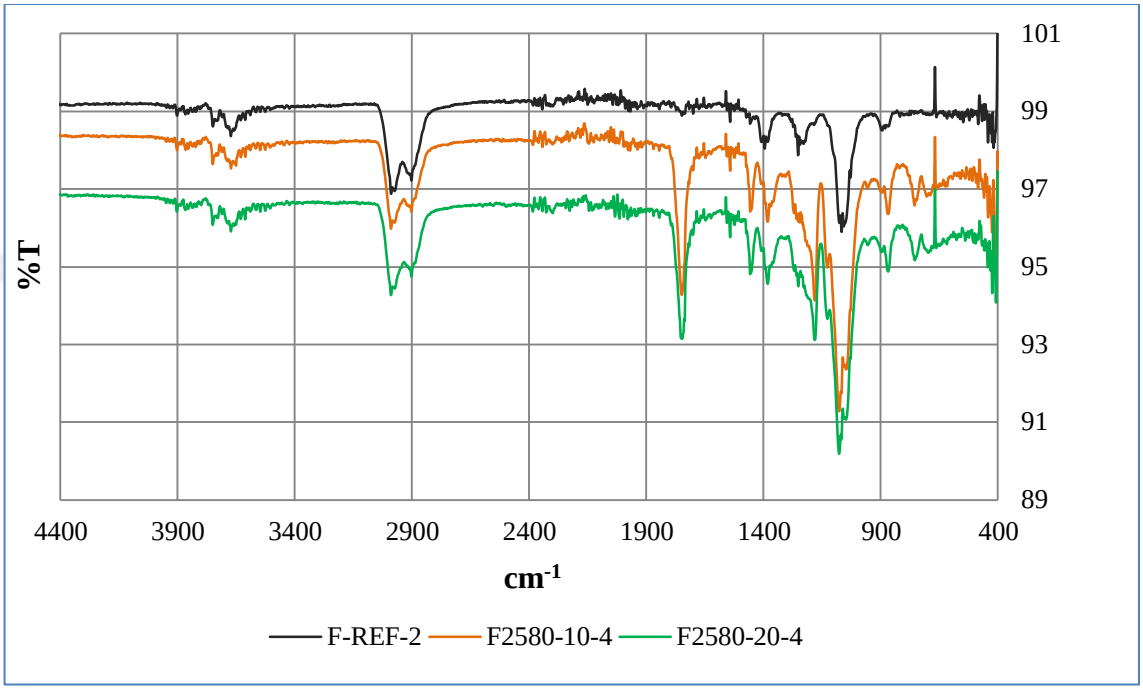
Şekil 5.48. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 5.47 ile verilen referans kemik numuneye ve Şekil 5.48 ile verilen 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş kemik numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3. ve 4. görüntülerde numunenin kırılma yüzeyleri, 5. ve 6. görüntülerde numune içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Hem referans numune hem de şartlandırılmış numunede kırılma sünek olarak gerçekleşmiştir. Her iki numuneye ait 5. ve 6. görüntülerde filament yüzeylerinde kırılma sonrasında oluşan yüzey durumları benzerdir. Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 5.41, 5.45) bu sünek kırılma durumunu desteklemektedir.

Şekil 5.47'deki 1. ve 2. görüntüler referans kemik numunenin yüzeylerini, Şekil 5.48'deki 1. ve 2. görüntüler ise 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş kemik numunenin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde referans ve şartlandırılmış numune yüzeylerinin benzerliği görülmektedir. Şartlandırmanın numunenin yüzey kalitesi üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi olmamıştır. Her iki yüzey de düzgündür ve filamentler birbirine yapışmıştır.

5.2.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

PLA filamenti 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletmenin etkisinin incelenmesi için belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.49).

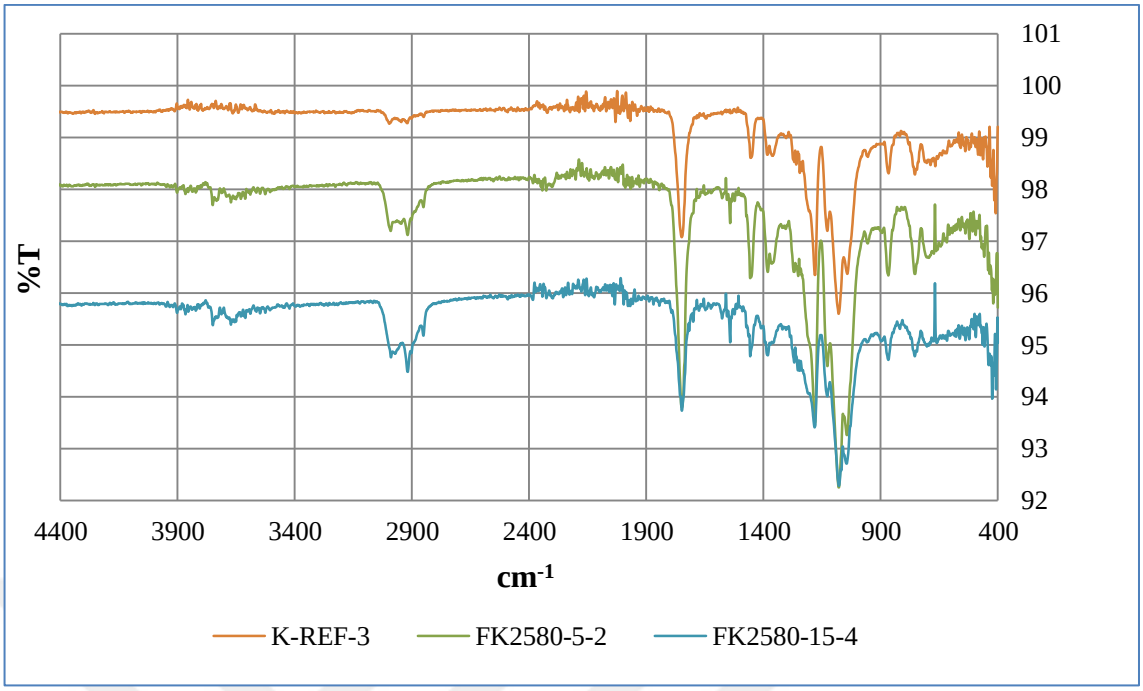


Şekil 5.49. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filament numunelerin FTIR analizleri.

Şekil 5.49'daki spektrumda PLA'ya ait tipik bantlar görülebilmektedir. PLA referans filament numunesinin; C-C gerilme bandı 895 cm^{-1}'de; C-O gerilme bandları 1066 cm^{-1} ve 1250 cm^{-1}'de; C-H bandı 1395 cm^{-1}'de ve C-H gerilme pikleri 2902 cm^{-1} ve 2988 cm^{-1}'de görülmektedir.

25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filament numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3749 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.49).

Şartlandırılmış PLA filamentten üretilen kemiklere 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletmenin etkisinin incelenmesi için filamentler belirtilen ortamda belirtilen süreler ile şartlandırılmış ve daha sonra üretilen belirli kemik numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.50).

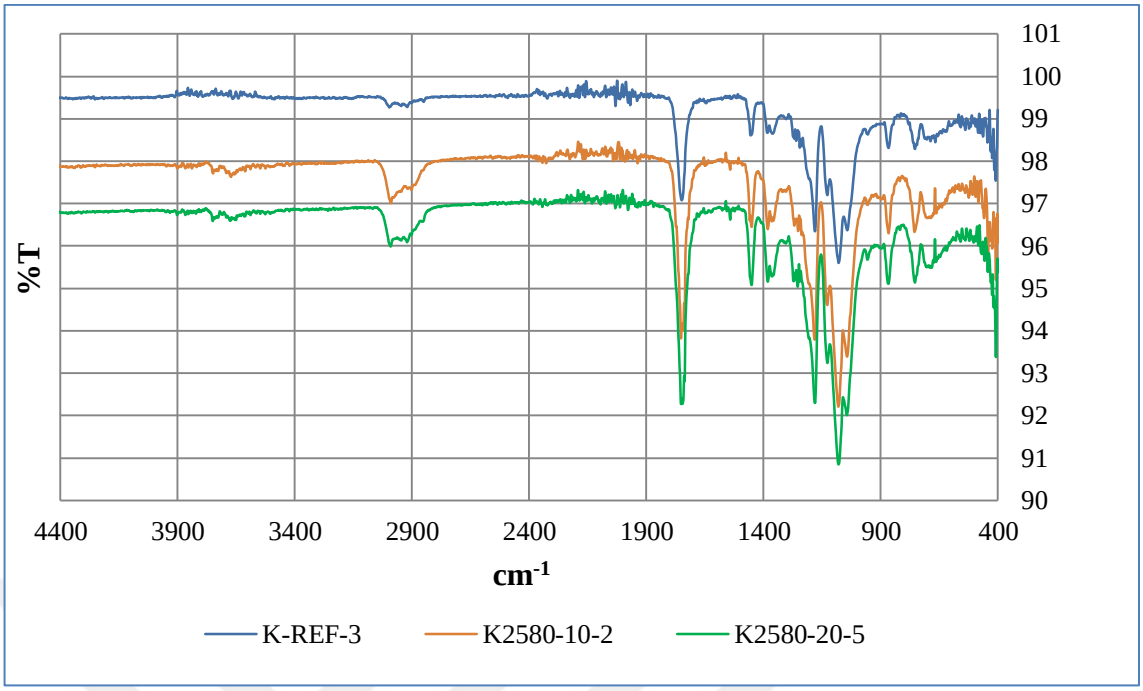


Şekil 5.50. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filamentten üretilen kemik numunelerin FTIR analizleri.

Şekil 5.50'deki spektrumda PLA'ya ait tipik bantlar görülebilmektedir. PLA filamentten üretilen kemik numunelerin; C-C gerilme bandı 866 cm^{-1}'de; C-O gerilme bandları 1078 cm^{-1} ve 1180 cm^{-1}'de; C-H bandı 1361 cm^{-1}'de; CH_3 bükülme absorpsiyon bandı 1453 cm^{-1}; C=O ester karbonil gerilme grupları 1748 cm^{-1}'de; ve C-H gerilme pikleri 2919 cm^{-1} ve 2997 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.50).

25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filamentten üretilen kemik numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3750 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.50).

PLA kemik numuneleri 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletmenin etkisinin incelenmesi için belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.51).



Şekil 5.51. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA kemik numunelerin FTIR analizleri.

Şekil 5.51'deki spektrumda PLA'ya ait tipik bantlar görülebilmektedir. PLA referans kemik numunesinin; C-C gerilme bandı 866 cm^{-1}'de; C-O gerilme bandları 1078 cm^{-1} ve 1180 cm^{-1}'de; C-H bandı 1361 cm^{-1}'de; CH_3 bükülme absorpsiyon bandı 1453 cm^{-1}; C=O ester karbonil gerilme grupları 1748 cm^{-1}'de; ve C-H gerilme pikleri 2919 cm^{-1} ve 2997 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.51).

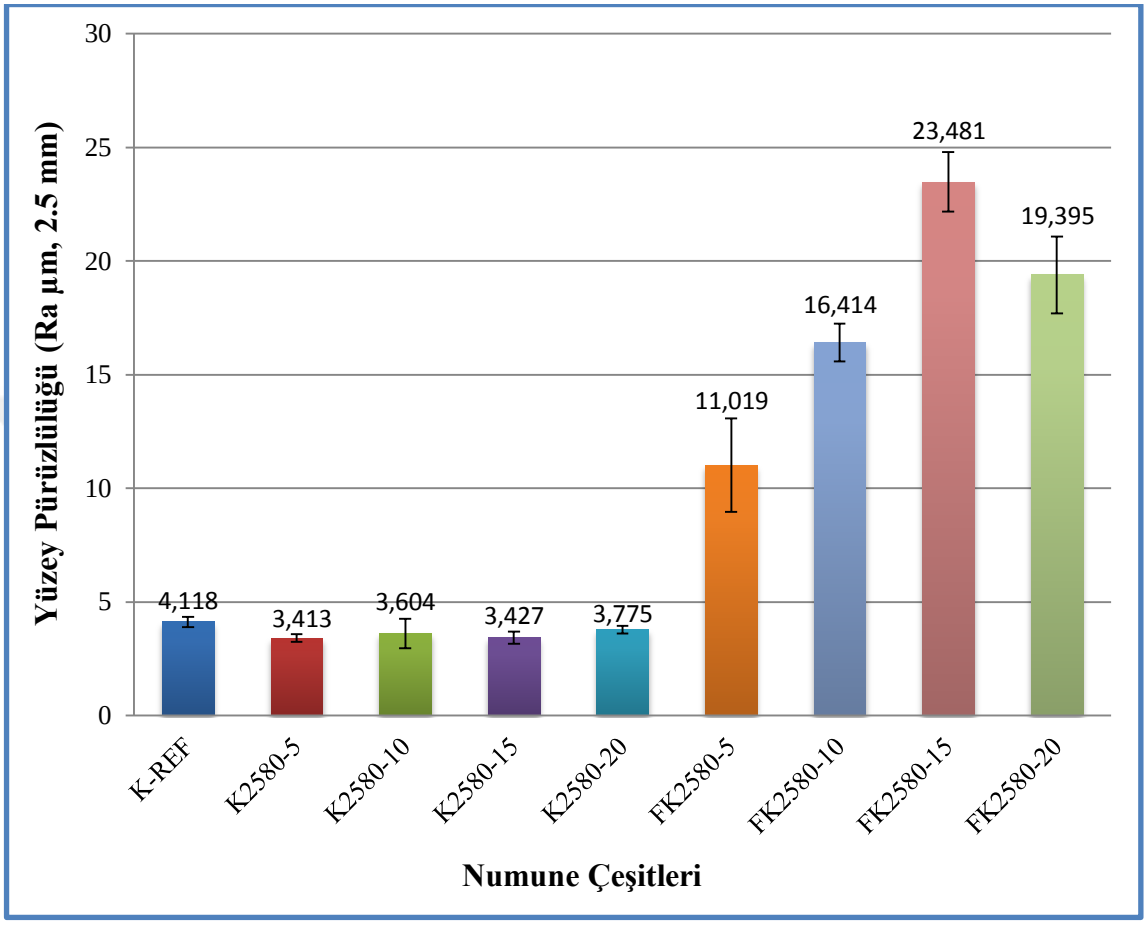
25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA kemik numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3750 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.51).

5.2.3. Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi

Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülüklerine ait değerler Şekil 5.52'deki grafik ile verilmiştir.

Şekil 5.52'deki grafikte görüldüğü gibi 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde bekletilen kemik numunelerin referans numuneye göre yüzey pürüzlülükleri azalmıştır yani yüzeyler daha pürüzsüz hale gelmiştir. Fakat 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde bekletilen filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülükleri referans numuneye göre oldukça artmıştır, yüzeyler daha pürüzlü hale

gelmiştir. Bunun sebebi yazdırma esnasında oluşan ve numune dayanımının da düşmesine neden olan baskı problemleridir. Yüzey pürüzlülüklerindeki bu artışın nedeni SEM yüzey görüntülerinde de açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.40).



Şekil 5.52. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde bekletilmiş PLA kemik ve aynı ortamda bekletilen PLA filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

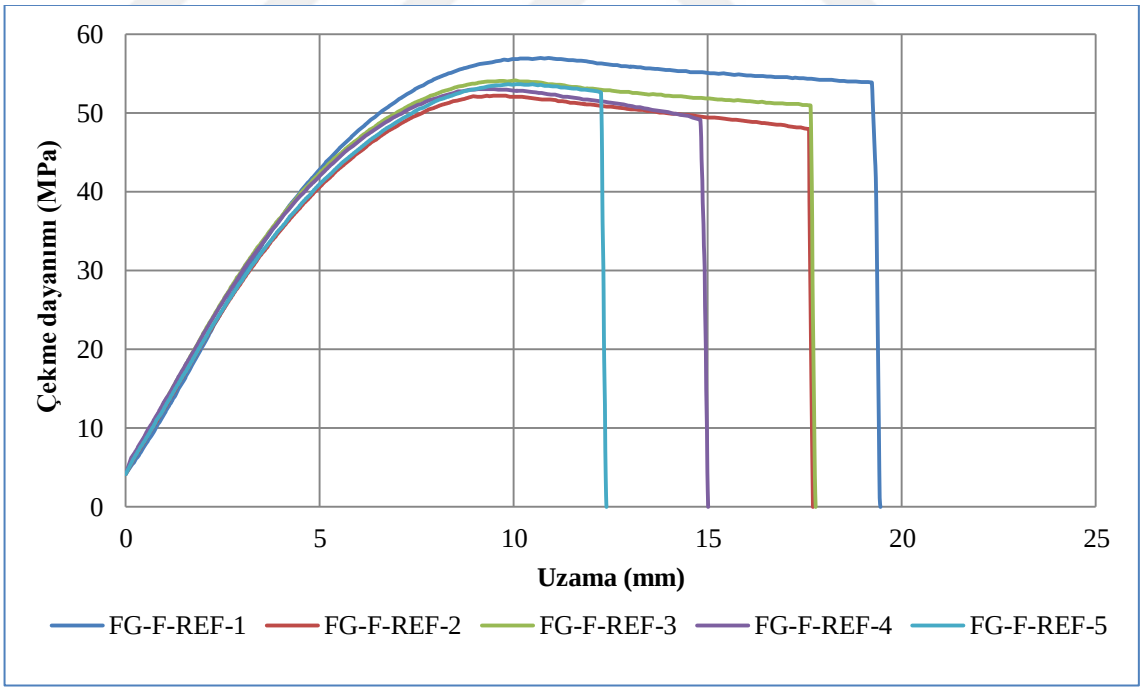
5.3. 25 °C Sıcaklık ve %80 Bağıl Nemli Ortam İçerisinde Şartlandırılan PLA/Grafit ve PLA/PHB Kompozit Numunelerin Mekanik ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Değerlendirilmesi

Kompozit numunelerin şartlandırılması için daha önce yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiş, numunelerde yüksek mekanik dayanım kaybına ve en fazla baskı problemine neden olan 25±0.5 °C sıcaklık, %80±2 bağıl nemli ortam içerisinde 15 gün sürelik şartlandırma durumu deneylerin uygulanması için seçilmiştir. Şartlandırılan PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit numunelerdeki değişimlerin değerlendirilebilmesi için filament numuneler belirlenen 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl

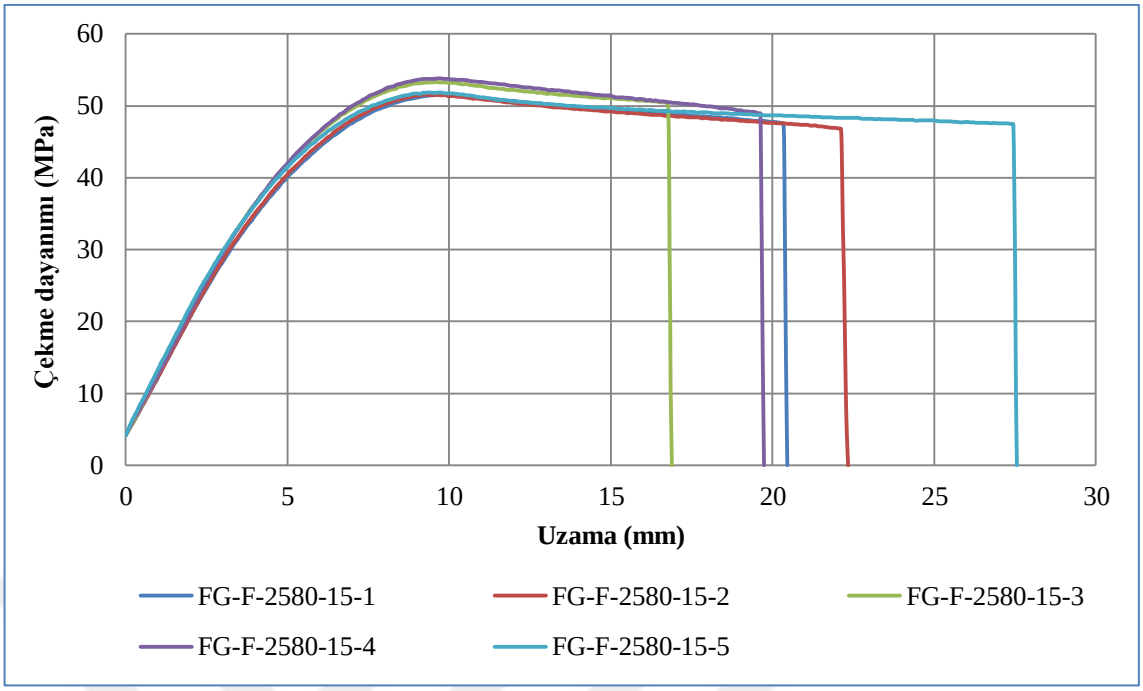
nemli ortam içerisinde 15 gün süre ile bekletilmişlerdir. Daha sonra şartlandırılmış olan filamentlerden kemik numuneler üretilmiş ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Şartlandırılmamış (referans) ve şartlandırılmış filament ve şartlandırılmış filamentlerden üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmış, çekme deneyi sonrası belirli kemik numunelerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri alınarak incelenmiş, kırılan numuneler fotoğraflanmış ve numunede oluşabilecek kimyasal veya fiziksel değişimlerin değerlendirilebilmesi amacı ile belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır.

5.3.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

PLA/Grafit kompozit filamenti 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 15 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Filament numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.53-5.54'te verilmiştir.



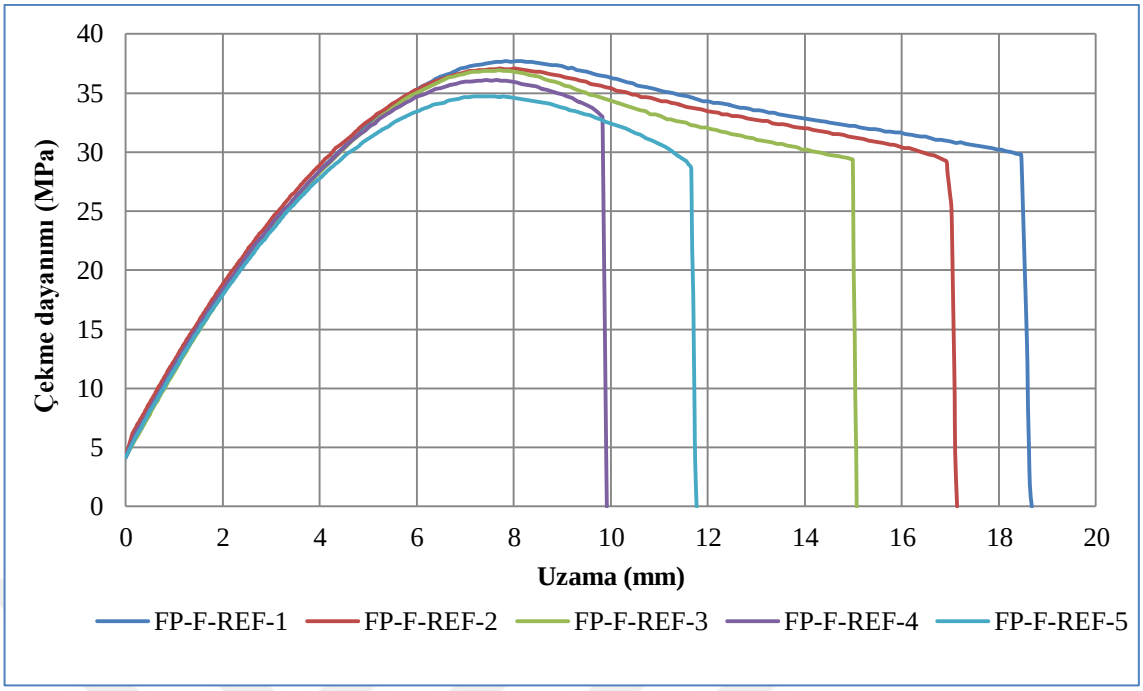
Şekil 5.53. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA/Grafit kompozit filament numunelerin çekme dayanımları.



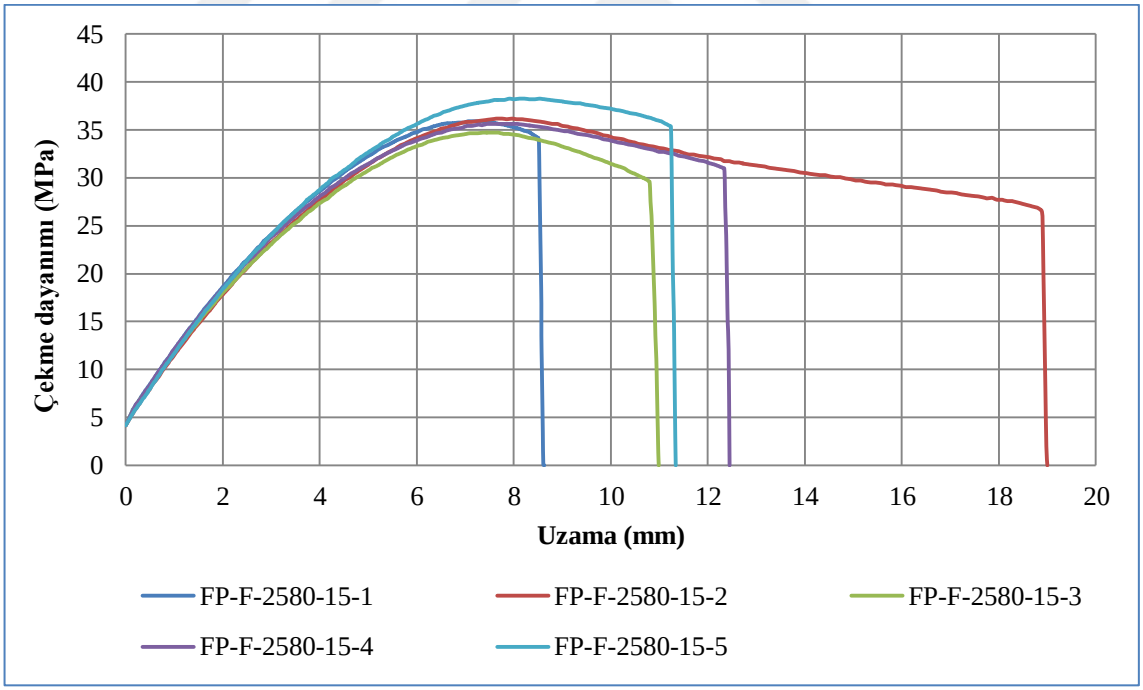
Şekil 5.54. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filament numunelerin çekme dayanımları.

PLA/Grafit kompozit filament numunelere ait Şekil 5.53 ve 5.54'teki çekme dayanımı-uzama eğrileri incelendiğinde referans ve şartlandırılmış numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermişler belirli bir uzama gösterip kopmuşlardır. Bu da malzemelerin sünek olduğunu göstermektedir. Numunelerin 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmelerinin süneklik davranışlarını arttırdığı görülmektedir. Eğriler incelendiğinde şartlandırılmış olan numuneler referans numuneye oranla boyun verdikten sonra kopmadan önce daha fazla uzamışlardır. Referans numuneler kopmada ortalama 16.54 mm uzarken şartlandırılmış numuneler ortalama 21.42 mm uzamıştır.

PLA/PHB kompozit filamenti 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 15 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Filament numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.55-5.56'da verilmiştir.



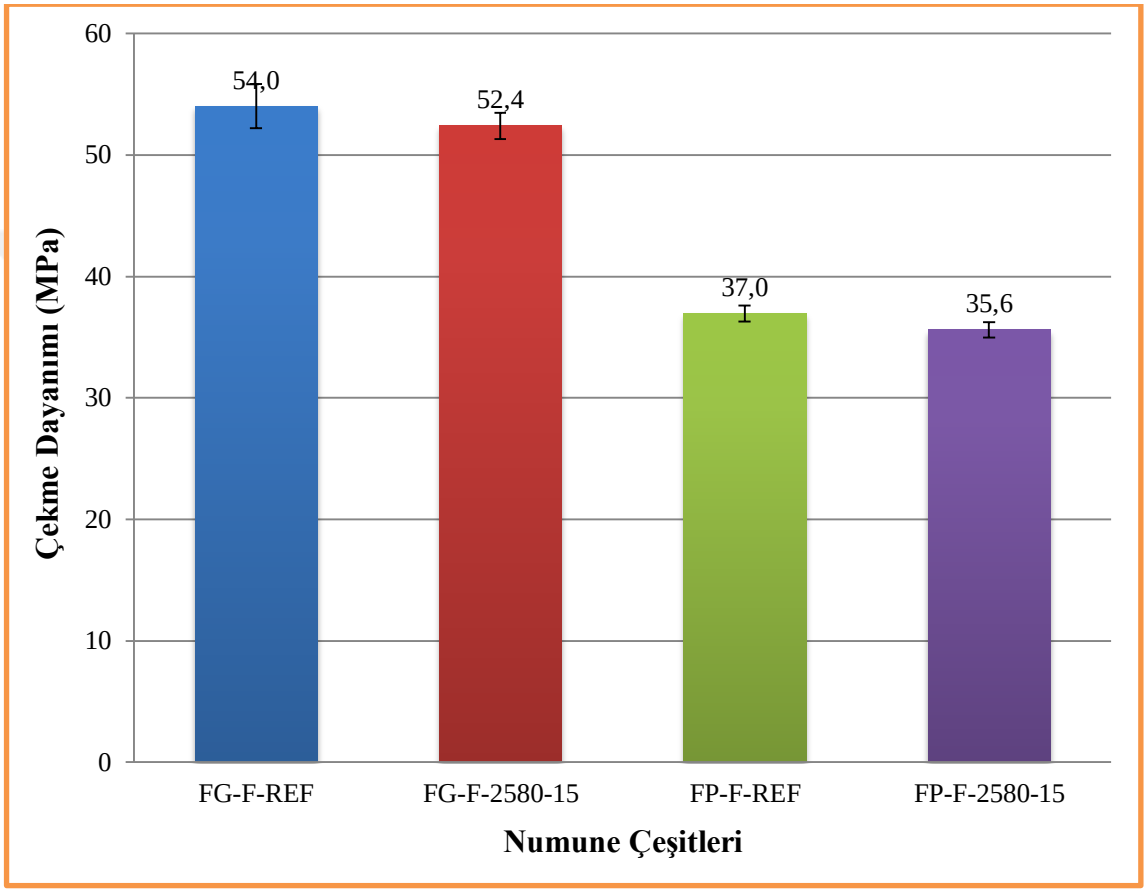
Şekil 5.55. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA/PHB kompozit filament numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.56. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filament numunelerin çekme dayanımları.

PLA/PHB kompozit filament numunelere ait Şekil 5.55 ve 5.56'daki çekme dayanımı-uzama eğrileri incelendiğinde referans ve şartlandırılmış numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermişler belirli bir uzama gösterip

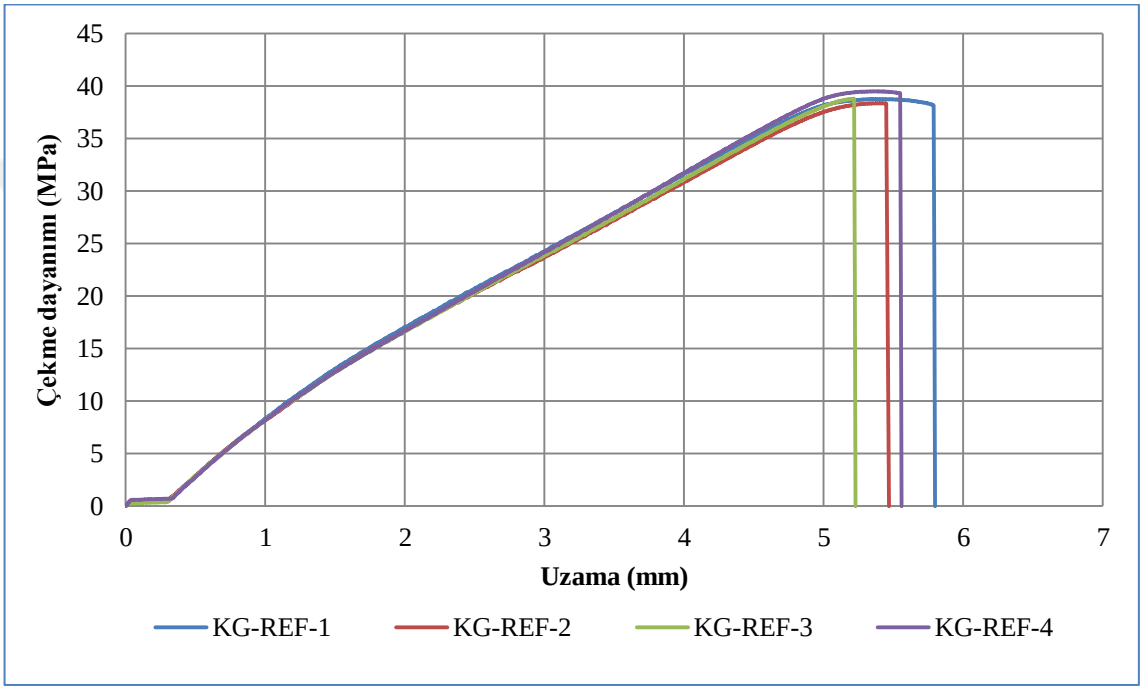
kopmuşlardır. Bu da malzemelerin sünek olduğunu göstermektedir. Numunelerin 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmelerinin süneklik davranışlarını azalttığı görülmektedir. Eğriler incelendiğinde şartlandırılmış olan numuneler referans numuneye oranla boyun verdikten sonra kopmadan önce daha az uzamışlardır. Referans numuneler kopmada ortalama 14.56 mm uzarken şartlandırılmış numuneler ortalama 12.55 mm uzamıştır.



Şekil 5.57. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filament numunelerin çekme dayanımları.

Referans, PLA/Grafit kompozit filament numunelere ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 5.57) incelediğinde %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmiş numunenin çekme dayanımı referans numuneye oranla %3 azalmıştır. Aynı grafikte PLA/PHB numunelere ait sütunlar incelendiğinde ise %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmiş numunenin çekme dayanımı referans numuneye oranla %3.8 azalmıştır.

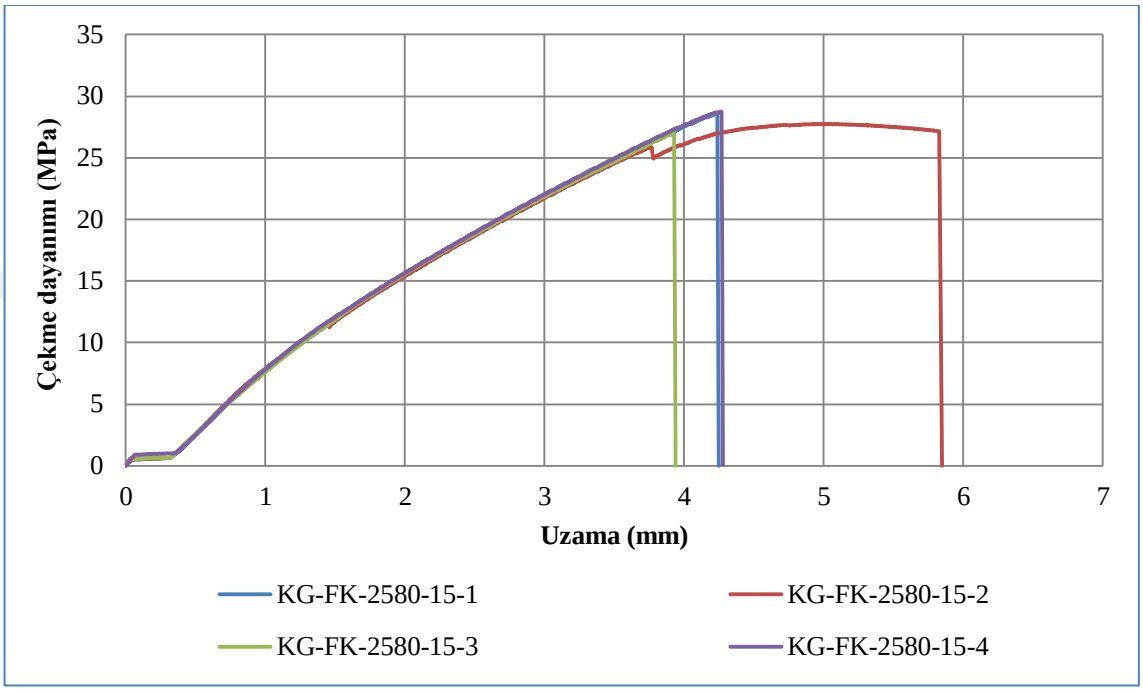
Şartlandırılmış PLA/Grafit kompozit filamentten üretilen kemiklere 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için filamentler belirtilen ortamda belirtilen süreler ile şartlandırılmış ve daha sonra üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Referans ve şartlandırılmış filamentten üretilen kemik numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.58-5.59'da verilmiştir.



Şekil 5.58. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

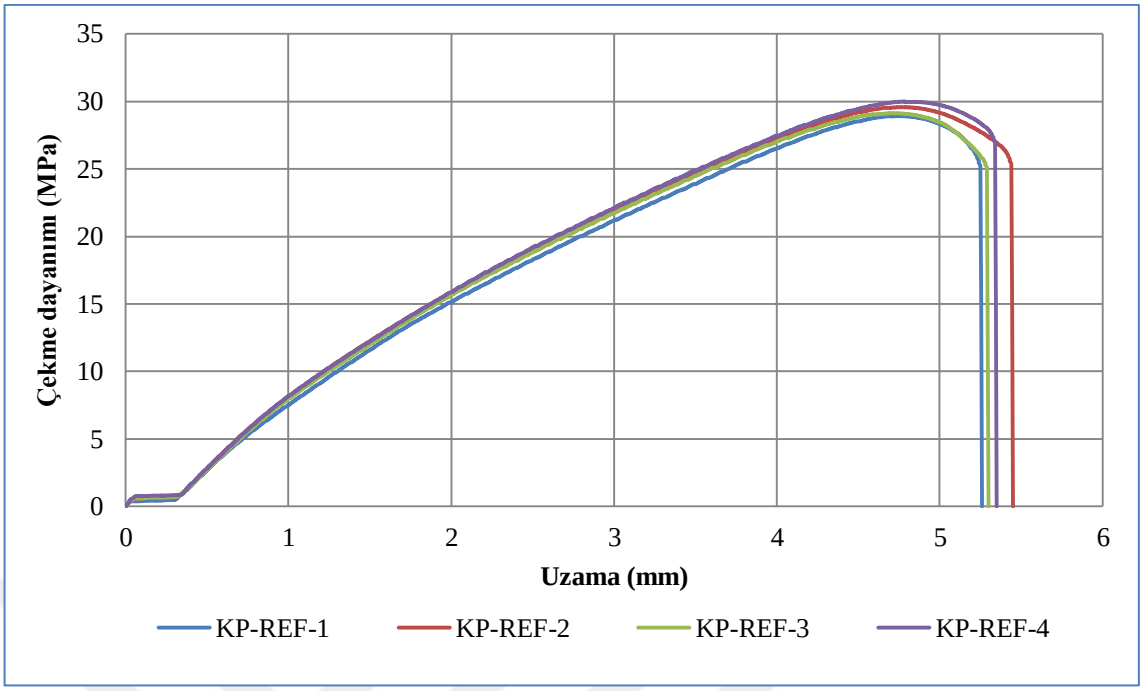
Referans ve şartlandırılmış PLA/Grafit kompozit filamentlerden basılan kemik numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri Şekil 5.58 ve 5.59'da gösterilmektedir. Referans numuneye ait eğriler (Şekil 5.58) incelendiğinde numuneler çekme dayanımı noktasında boyun vermiş ve kısa bir uzama gösterip kopmuştur. Bu da malzemenin yarı sünek olduğunu göstermektedir. 15 gün süre ile şartlandırılmış filamentten basılan numuneye ait eğriler (Şekil 5.59) incelendiğinde ise numune maksimum çekme dayanımı noktasında kopmuştur. Bu da malzemenin gevrek olduğunu göstermektedir.

Filamentin 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmesinin yazdırılan numunelerin sünek-gevrek davranışları üzerinde etkisi olmuştur. Şartlandırılmış filamentten yazdırılan numuneler hem daha az uzamışlar hem de daha ani kırılmışlardır. Buna göre şartlandırılmış filamentten yazdırılan numune referans numuneye göre daha gevrektir.

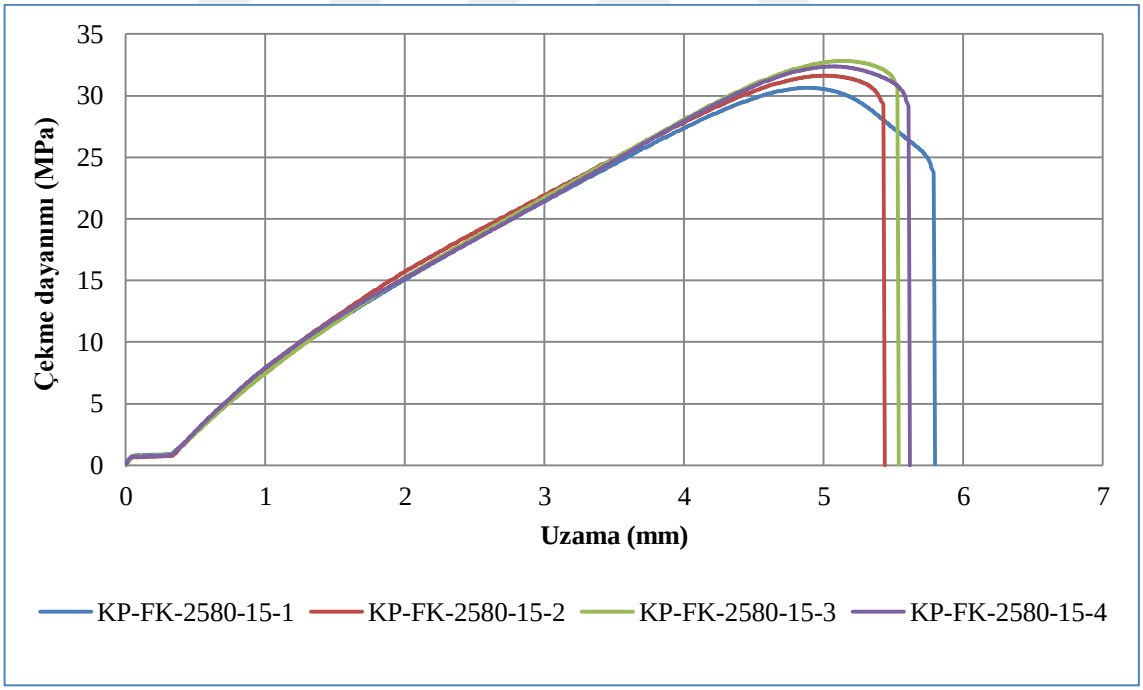


Şekil 5.59. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

Şartlandırılmış PLA/PHB kompozit filamentten üretilen kemiklere 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için filamentler belirtilen ortamda belirtilen süreler ile şartlandırılmış ve daha sonra üretilen kemik numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait kuvvet (N)-uzama (mm) değerleri elde edilmiş ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Referans ve şartlandırılmış filamentten üretilen kemik numuneler için çizilen eğriler Şekil 5.60-5.61'de verilmiştir.



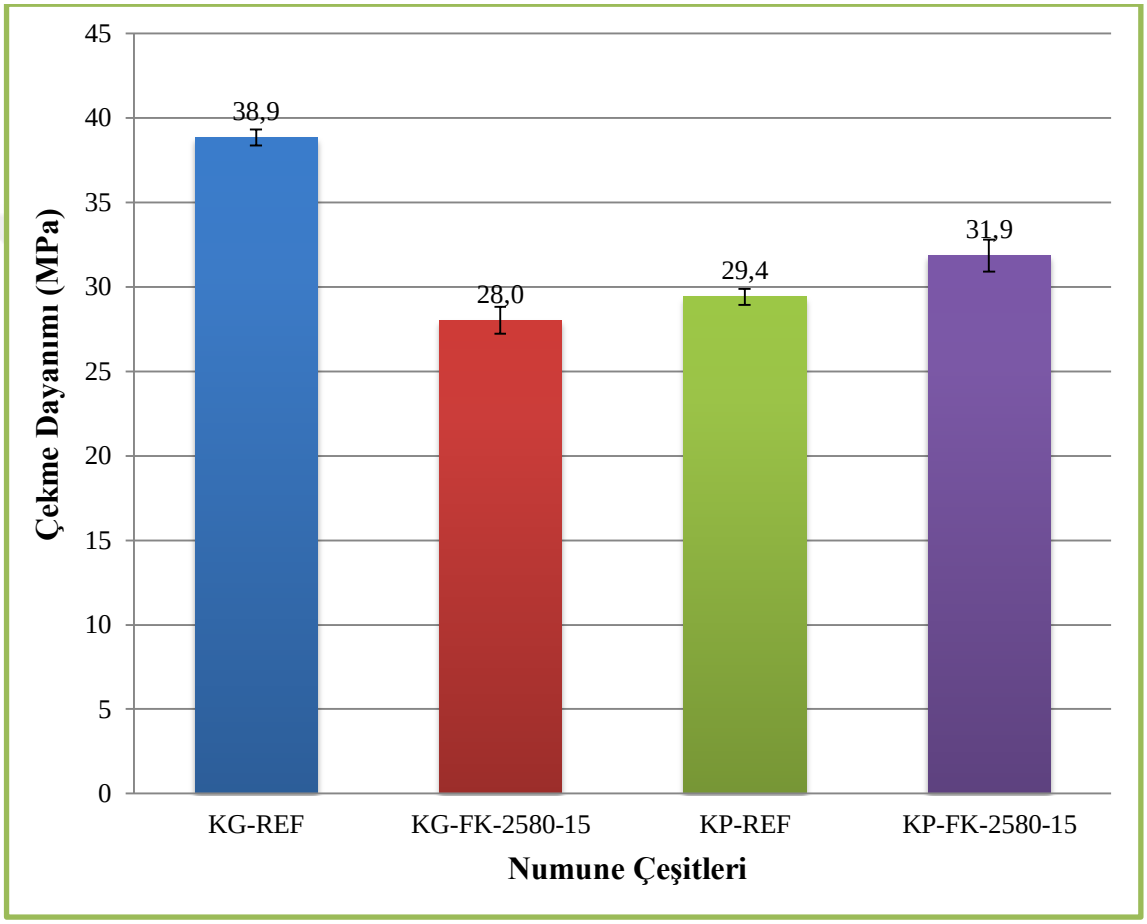
Şekil 5.60. Herhangi bir ortama maruz bırakılmamış (referans) PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.



Şekil 5.61. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

Referans ve şartlandırılmış PLA/PHB kompozit filamentlerden basılan kemik numunelere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri Şekil 5.60 ve 5.61'de gösterilmektedir. Referans numuneye ait (Şekil 5.60) ve 15 gün süre ile şartlandırılmış filamentten

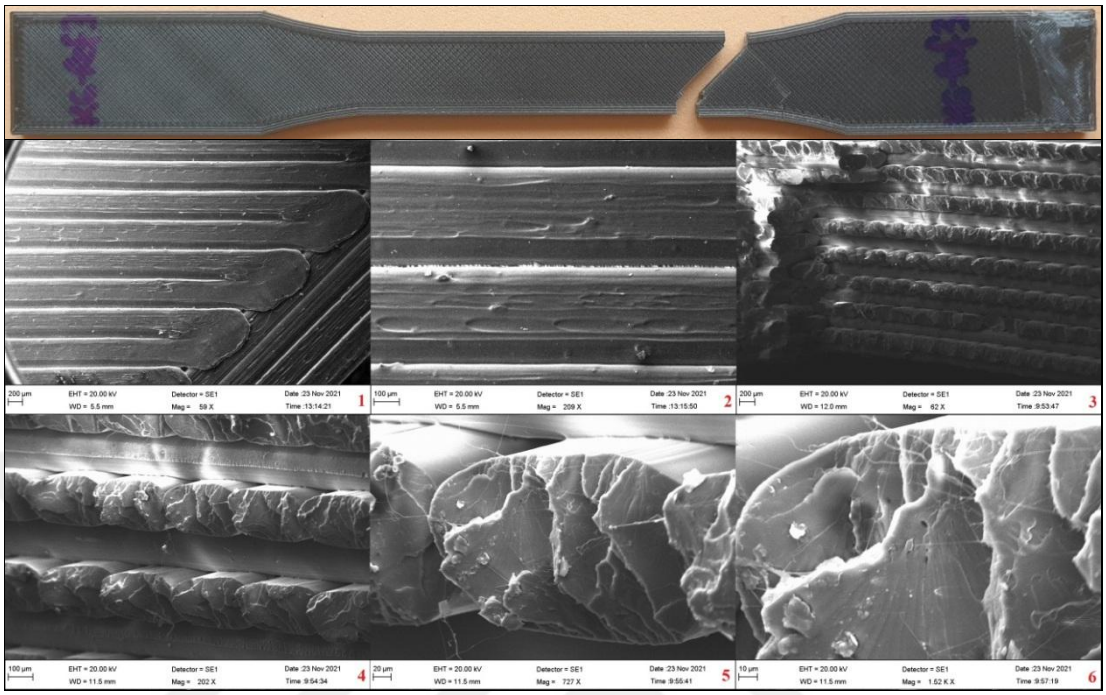
basılan numuneye ait eğriler (Şekil 5.61) incelendiğinde her iki numune de maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş ve belirli bir uzama gösterip kopmuştur. Bu da malzemelerin yarı sünek olduğunu göstermektedir. Her iki eğride de kopmadan önceki uzama miktarları birbirine yakındır ve boyun verme noktasından sonraki değişim aynıdır. Filamentin 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmesinin yazdırılan numunelerin süneklik davranışı üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır.



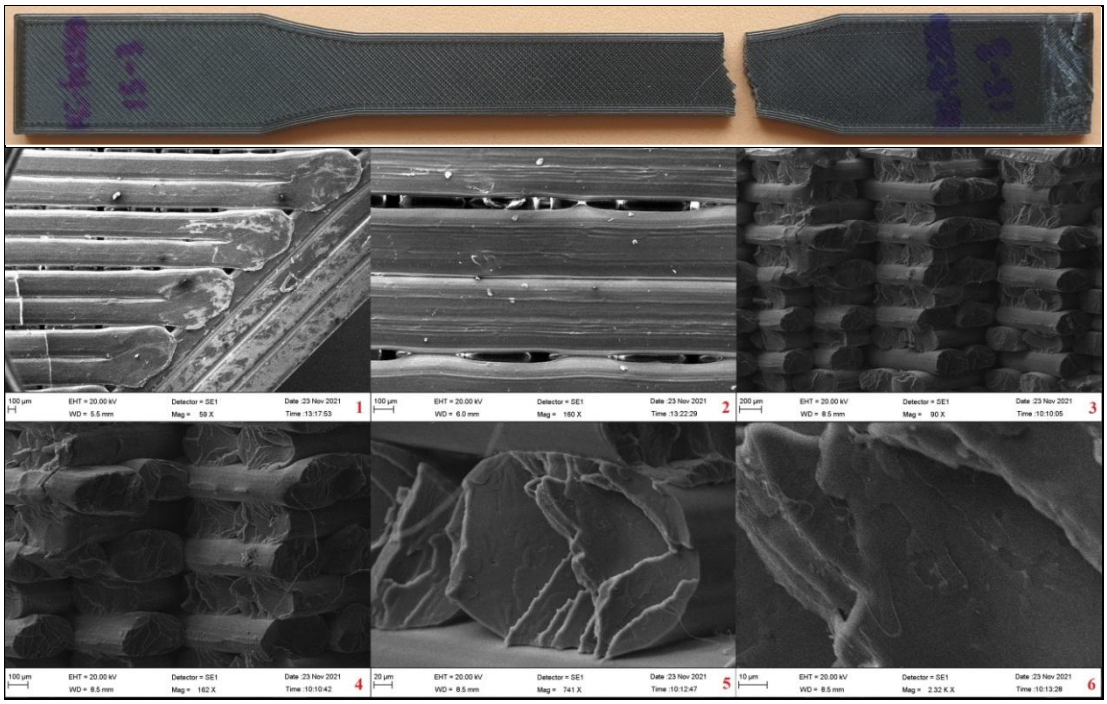
Şekil 5.62. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin çekme dayanımları.

Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelere ait çekme dayanımı grafiği Şekil 5.62'de verilmiştir. PLA/Grafit kompozit filamentten basılan numunelere ait grafik sütunları incelendiğinde %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmiş filamentten basılan numunenin çekme dayanımı referans numuneye oranla %28 azalmıştır. PLA/PHB kompozit filamentten basılan numunelere ait grafik sütunları incelendiğinde

ise %80 bağıl nemli ortamda 15 gün bekletilmiş filamentten basılan numunenin çekme dayanımı referans numuneye oranla %8.5 artmıştır.



Şekil 5.63. Şartlandırılmamış PLA/Grafit kompozit filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

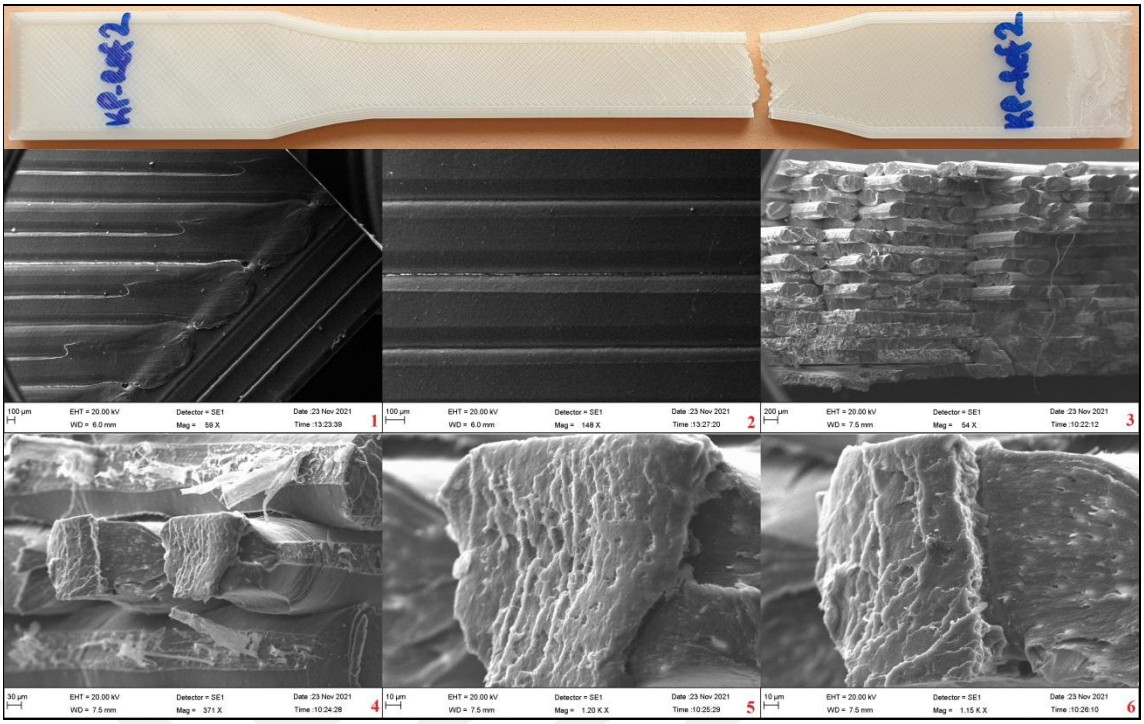


Şekil 5.64. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

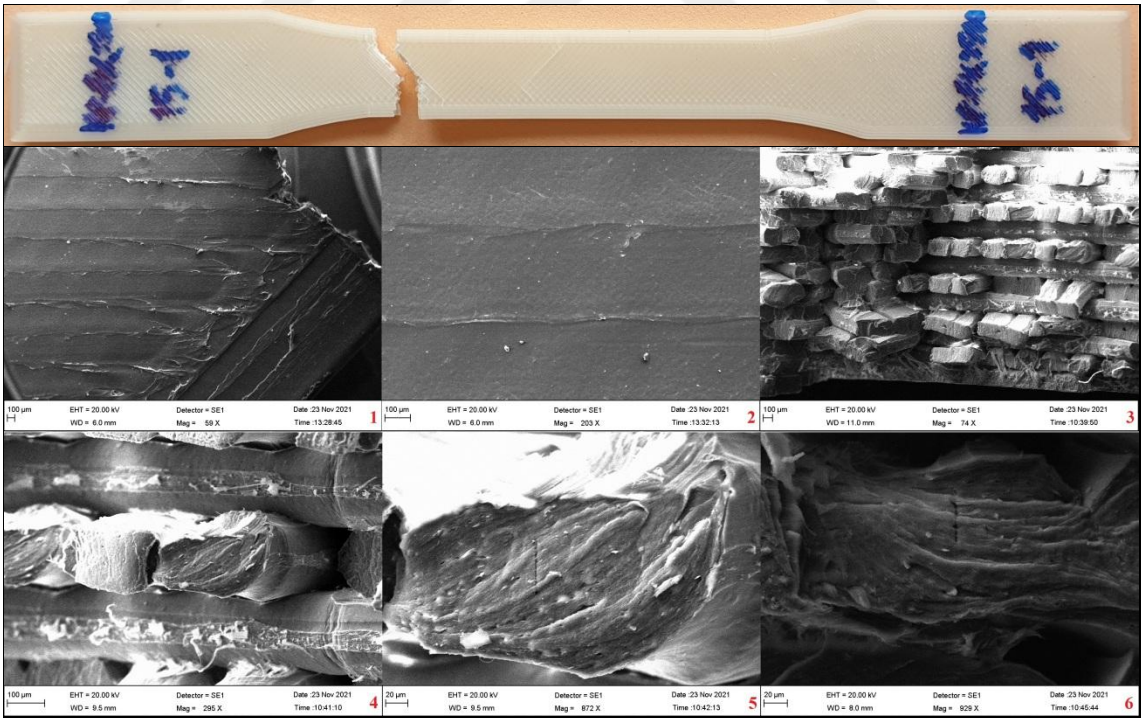
Şekil 5.63 ile verilen referans PLA/Grafit kompozit kemik numuneye ve Şekil 5.64 ile verilen %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş filamentten basılan PLA/Grafit kompozit kemik numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3. ve 4. görüntülerde numunenin kırılma yüzeyleri, 5. ve 6. görüntülerde numune içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Referans numunede ve numune içindeki filamentte kırılma daha yumuşak, sünek gerçekleşirken şartlandırılmış olan numunede kırılma daha keskin, gevrek olarak gerçekleşmiştir. Referans numunenin Şekil 5.58'deki çekme dayanımı-uzama eğrisi incelendiğinde de numunenin sünek veya gevrek şekilde kırılmadığı yarı sünek davranış sergilediği öngörülebilmektedir. Oysa ki şartlandırılmış numuneneye ait eğride (Şekil 5.59) kırılmanın ani olarak gerçekleşmesi numunenin gevrek olarak kırılmasını açıklamaktadır. PLA/Grafit kompozitlerdeki bu kırılma durumları PLA numunelerde gerçekleşen kırılmalar ile aynıdır. PLA'nın içerisine eklenen grafit kırılma davranışını değiştirmemiştir.

Şekil 5.63'teki 1. ve 2. görüntüler referans PLA/Grafit kompozit kemik numunenin yüzeylerini, Şekil 5.64'deki 1. ve 2. görüntüler ise %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş filamentten basılan kemik numunenin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde şartlandırılmış numunedeki baskı kalitesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Referans numune yüzeylerinde baskı esnasında filamentler arasında boşluk yoktur ve filamentler birbirine yapışmıştır fakat şartlandırılmış numunede bazı bölgelerde filamentler arasında boşluk oluşmuş filamentler birbirine tam olarak yapışmamıştır. Bu da baskı ve yüzey kalitesinin bozulmasına, çekme dayanımının azalmasına neden olmuştur.

Şekil 5.65 ile verilen referans PLA/PHB kompozit kemik numuneye ve Şekil 5.66 ile verilen 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3. ve 4. görüntülerde numunenin kırılma yüzeyleri, 5. ve 6. görüntülerde numune içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Hem referans numunede hem de şartlandırılmış numunede kırılma yarı sünek bir şekilde gerçekleşmiştir. Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 5.60, 5.61) yarı sünek kırılma durumlarını desteklemektedir. PLA numunelerde şartlandırma ile oluşan kırılmadaki değişim PLA/PHB kompozitlerde oluşmamıştır. Malzeme her iki durumda da benzer kırılma davranışı sergilemiştir.



Şekil 5.65. Şartlandırılmamış PLA/PHB kompozit filamentten basılan referans kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

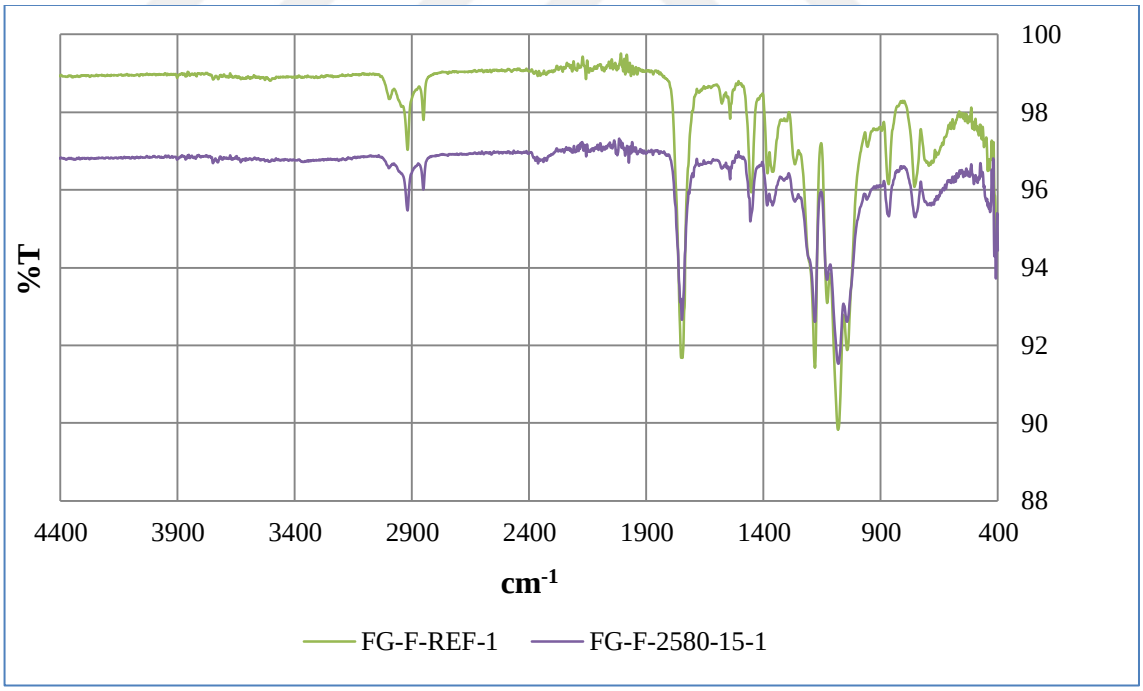


Şekil 5.66. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

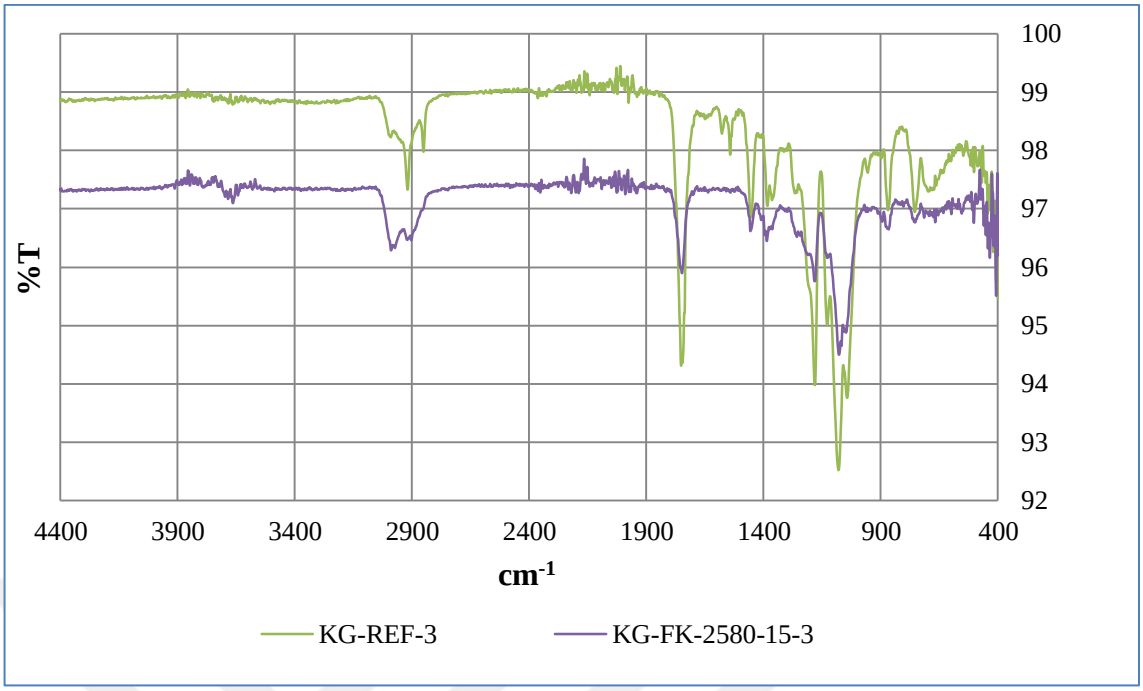
Şekil 5.65'teki 1. ve 2. görüntüler referans PLA/PHB kompozit kemik numunenin yüzeylerini, Şekil 5.66'daki 1. ve 2. görüntüler ise 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunenin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde şartlandırılmış numunenin baskı kalitesinde olumsuz herhangi bir değişim olmamış aksine filamentler referans numuneden daha iyi birbirine yapışmıştır. Referans numune yüzeylerinde filamentler arasında oluşan hafif çukurlar şartlandırılmış numunelerde yoktur. Bu da yüzey ve baskı kalitesinin ve de çekme dayanımının artmasına neden olmuştur. Şekil 5.62'deki sütun grafikte bu artış görülmektedir.

5.3.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

PLA/Grafit kompozit filamenti 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir.



Şekil 5.67. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filament numunelerin FTIR analizleri.

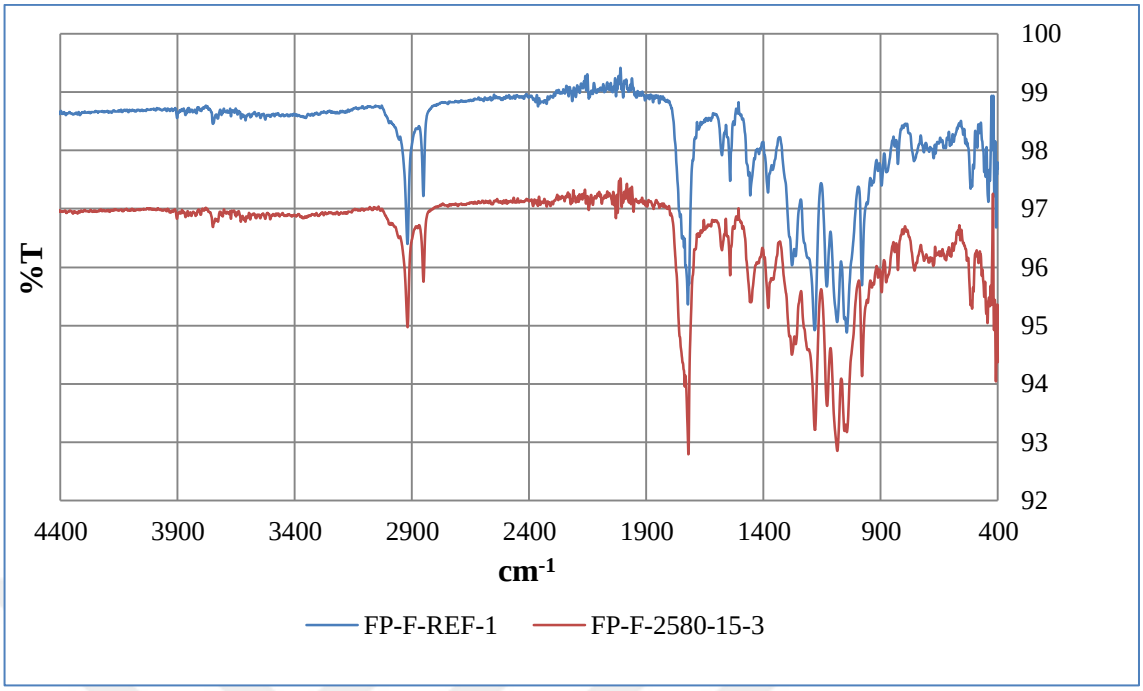


Şekil 5.68. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunelerin FTIR analizleri.

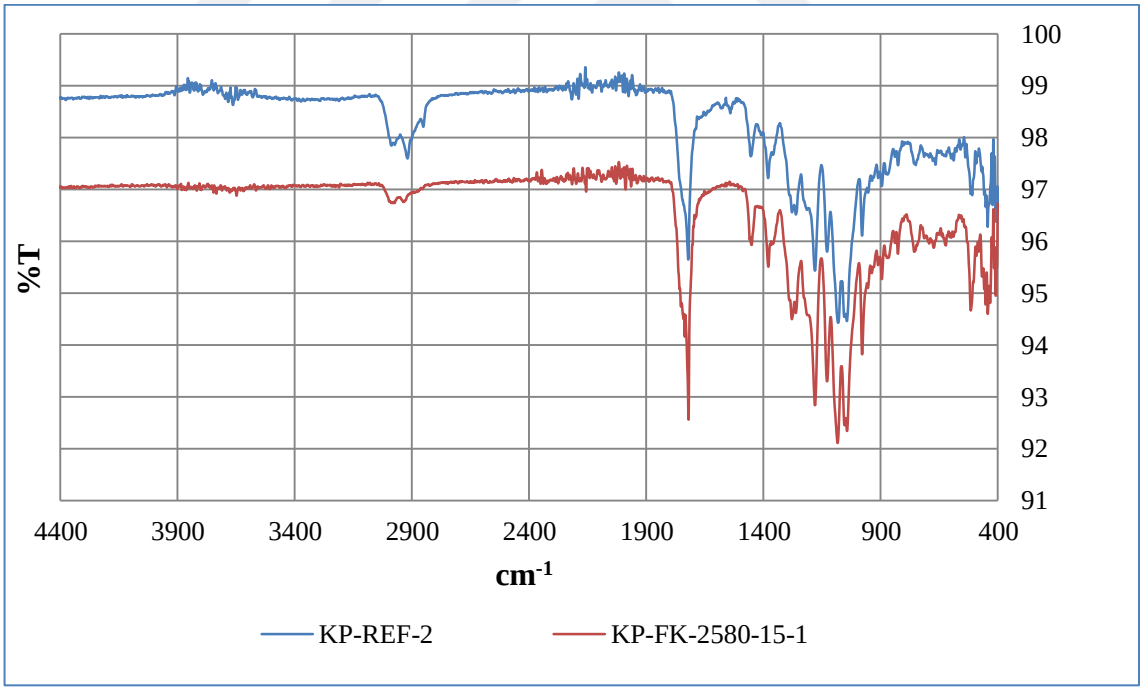
PLA-Grafit referans numuneleri ile birlikte şartlandırılmış filament ve filamentlerden basılan kemik numunelerin FTIR spektrumu, Şekil 5.67-5.68'de görülmektedir. 3000–2800 cm^{-1}, 1755 cm^{-1} ve 1250–1000 cm^{-1}'de bulunan C–H, C=O ve C–O–C gruplarından poli(laktik asit) için karakteristik bantların yoğunluğu, yavaş yavaş azalır. Numunelerdeki grafit içeriğinin arttırılması, numunenin kendisinin azaltılmış geçirgenliğinin neden olduğu bant kaybına neden olur (Przekop vd., 2020).

25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten basılan kemik numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3665 cm^{-1}'de görülmektedir (Şekil 5.68).

PLA/PHB kompozit filamenti 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için belirli numunelere FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir.



Şekil 5.69. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/PHB kompozit filament numunelerin FTIR analizleri.



Şekil 5.70. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin FTIR analizleri.

PLA-PHB referans numuneleri ile birlikte şartlandırılmış filament ve filamentlerden basılan kemik numunelerin FTIR spektrumu, Şekil 5.69-5.70'te görülmektedir. Şekil 5.69'da bulunan PLA/PHB kompozit referans filament

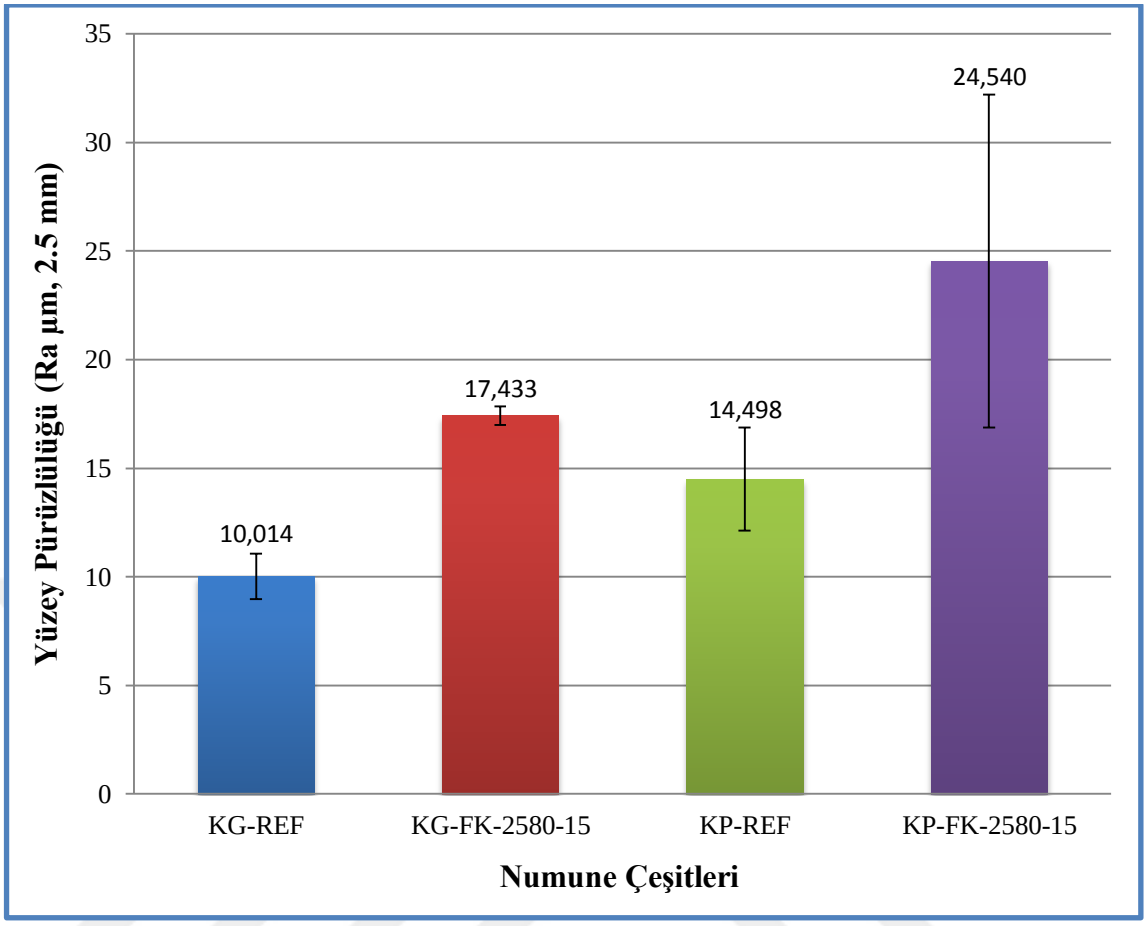
numunesinin karbonil bandı (C=O) 1708 cm^{-1} iken şartlandırılmış PLA/PHB kompozit filament numunesinin karbonil bandı (C=O) 1720 cm^{-1} dalga sayılarına doğru kaydığı görülüyor. Benzer olarak Şekil 5.70'de PLA/PHB kompozit referans filamentten basılan kemik numunesinin karbonil bandı (C=O) 1706 cm^{-1} iken şartlandırılmış PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunesinin karbonil bandı (C=O) 1720 cm^{-1} dalga sayılarına doğru kaydığı görülüyor. PLA ve PHB yarı kristalli polimerler olduğundan, FTIR spektral profilleri, karşılık gelen fiziksel durumlarından ve kristal yapılarından büyük ölçüde etkilenir. Aslında, kristalin düzen durumundaki farklılıkları nedeniyle, PHB PLA'dan daha kristallidir ve karbonil bantları FTIR'da önemli ölçüde farklılık gösterir (Arrieta vd., 2017). Karbonil grubu germe titreşiminin daha yüksek dalga sayılarına doğru hafif bir kayma filamente göre 3B baskı sırasında kristal fazda bir artış olduğunu gösterir (Ausejo vd., 2018).

5.3.3. Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi

Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülüklerine ait değerler Şekil 5.71'deki grafik ile verilmiştir.

Şekil 5.71'deki grafikte görüldüğü gibi 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde bekletilen PLA/Grafit filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülükleri referans numuneye göre oldukça artmıştır, yüzeyler daha pürüzlü hale gelmiştir. Bunun sebebi PLA numunelerde olduğu gibi yazdırma esnasında oluşan ve numune dayanımının da düşmesine neden olan baskı problemleridir. Yüzey pürüzlülüklerindeki bu artışın nedeni SEM yüzey görüntülerinde de açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.64).

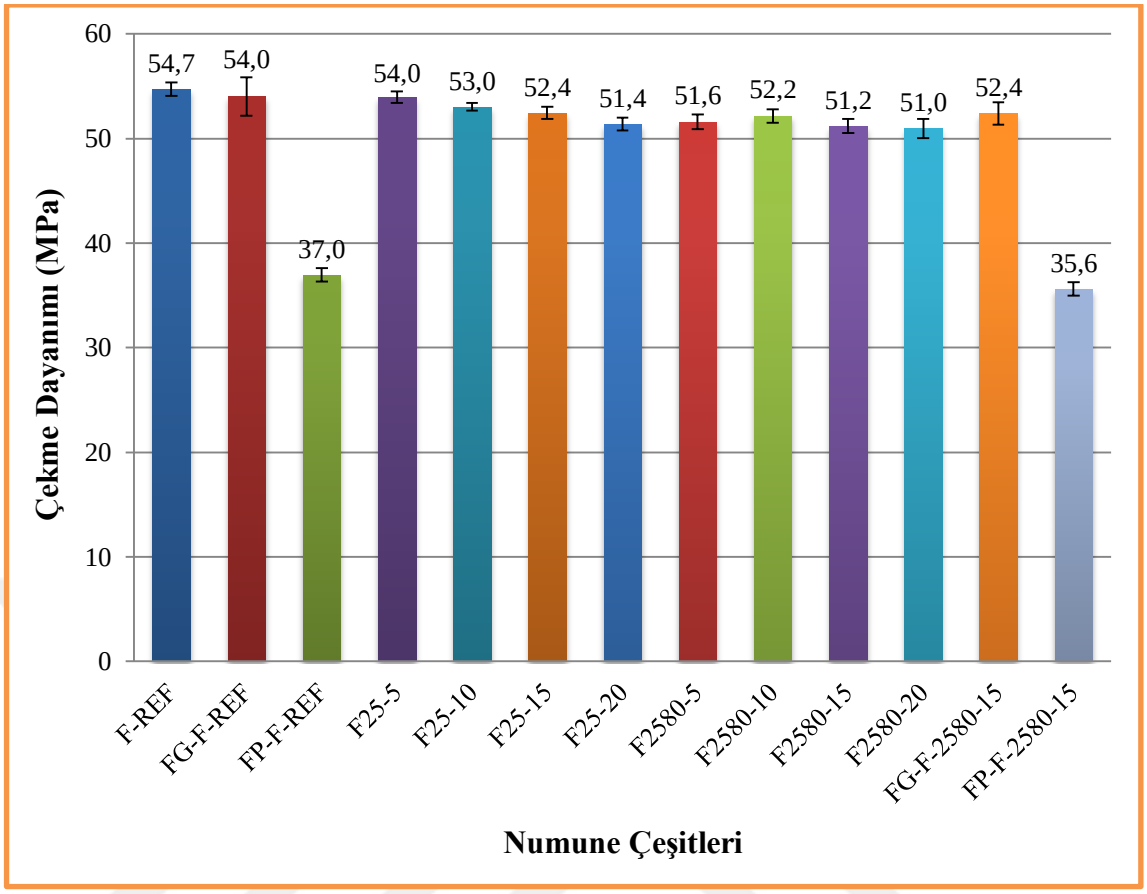
Aynı grafikte 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde bekletilen PLA/PHB filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülükleri de referans numuneye göre oldukça artmıştır, yüzeyler daha pürüzlü hale gelmiştir. Bunun sebebi yazdırma esnasında numunenin baskı tablasından kalkmasıdır. Şekil 5.71'deki grafikte numuneye ait sütun incelendiğinde bu durum yüzey pürüzlülük değeri standart sapmasının çok fazla olmasına neden olmuştur.



Şekil 5.71. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/Grafit, PLA/PHB kompozit filamentten basılan kemik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

5.4. Sonuç ve Öneriler

Tüm filament numunelere ait çekme dayanımları Şekil 5.72'deki grafik ile toplu olarak verilmiştir. Tüm 25 °C sıcaklıktaki suda, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş filament numunelerin çekme dayanımları bekletme gün sayısı farketmeksizin düşmüştür. En yüksek dayanım düşüşü 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş filamentte gerçekleşmiştir.

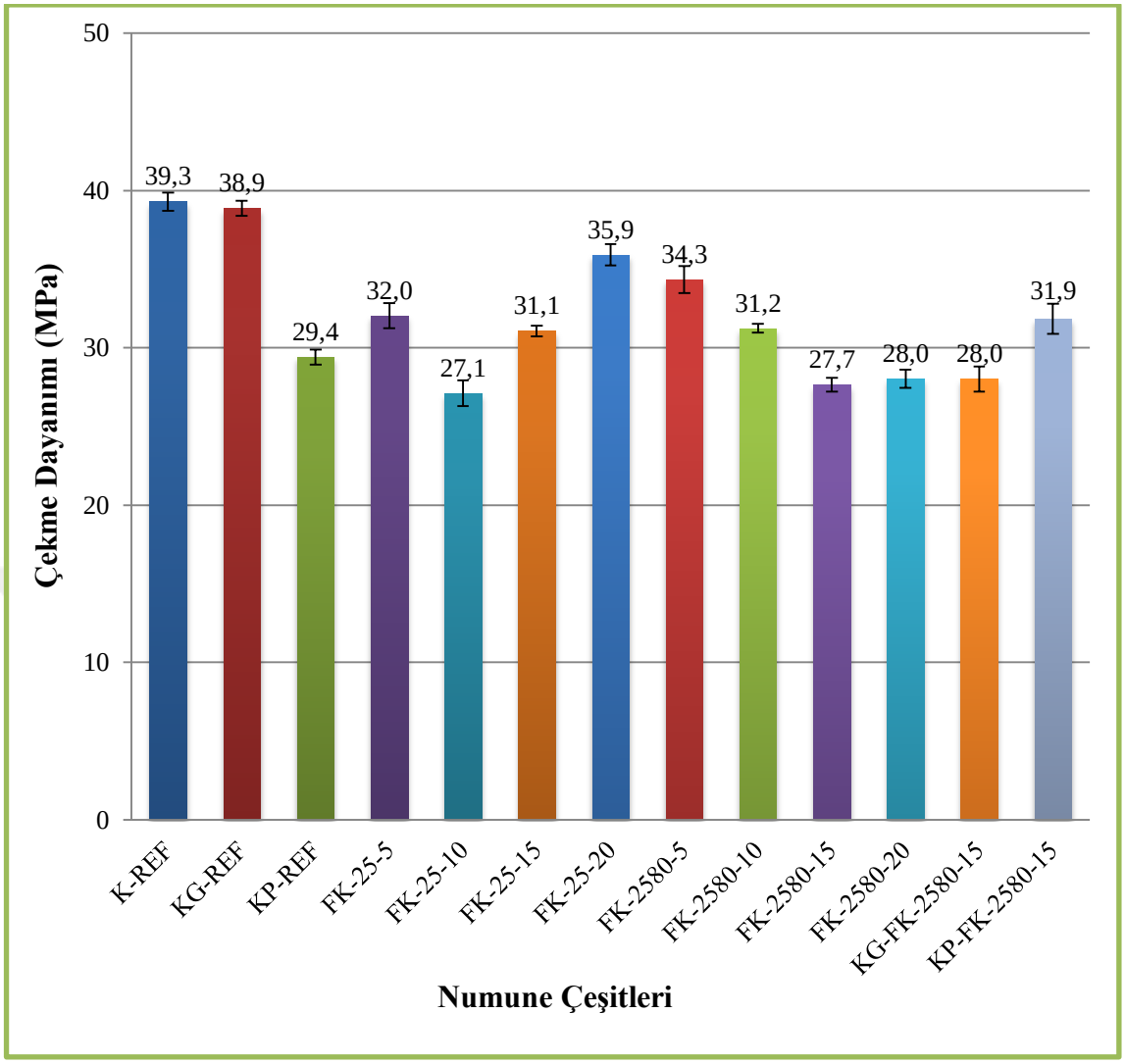


Şekil 5.72. Tüm filament numunelerin çekme dayanımları.

Tüm şartlandırılmış filamentten yazdırılan kemik numunelere ait çekme dayanımları Şekil 5.73'teki grafik ile toplu olarak verilmiştir. Tüm 25 °C sıcaklıktaki suda, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA filamentten yazdırılan kemik numunelerin çekme dayanımları bekletme gün sayısı farketmeksizin düşmüştür. En yüksek dayanım düşüşü 25 °C sıcaklıktaki suda 10 gün süre ile bekletilmiş kemik numunede gerçekleşmiştir.

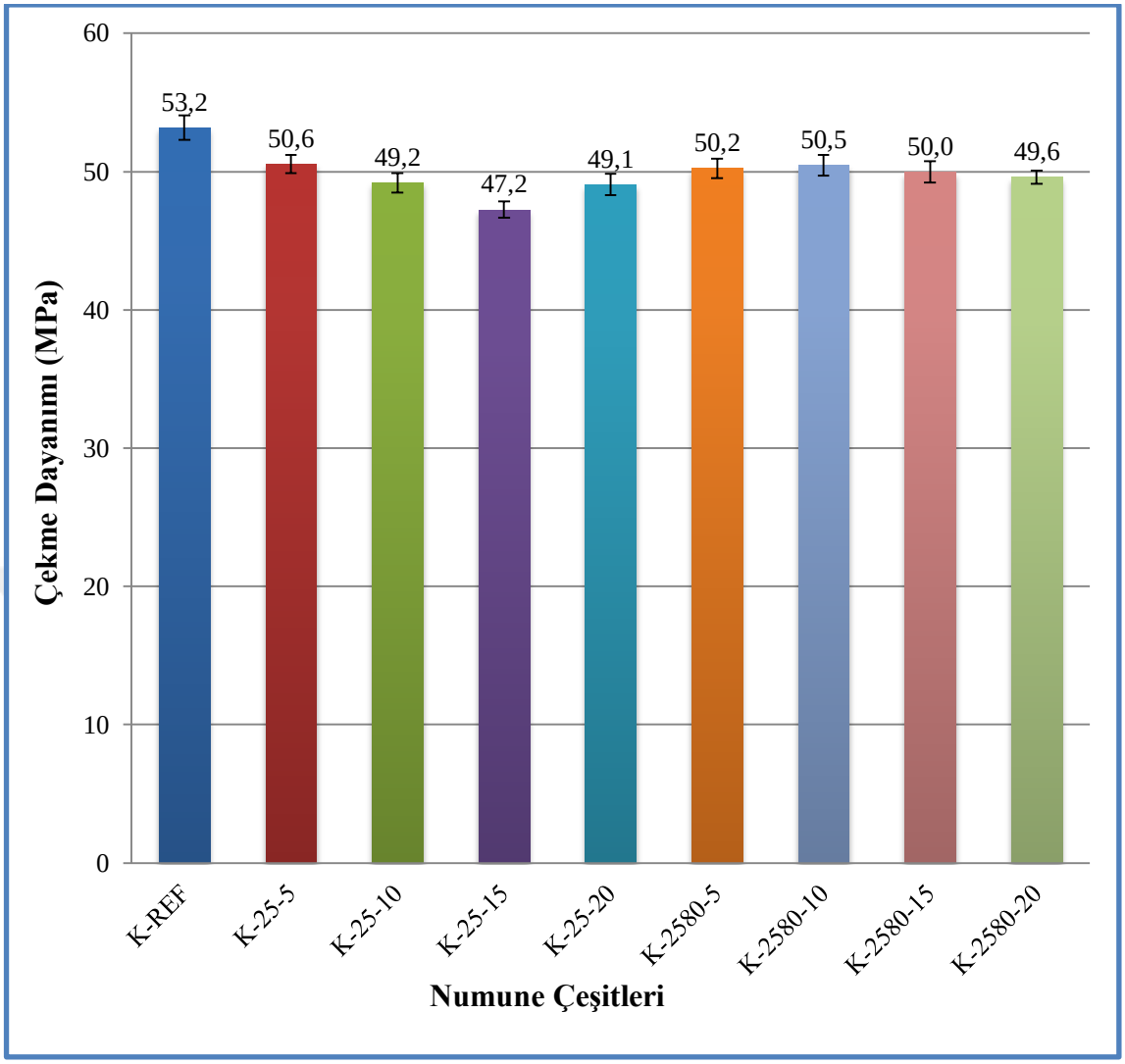
25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA/Grafit kompozit filamentten yazdırılan mununede PLA numunelere benzer çekme dayanımı düşüşü görülmüştür.

Tüm numunelerde şartlandırma ile meydana gelen çekme dayanımındaki düşüş PLA/PHB kompozit numunelerde meydana gelmemiştir. Diğer numunelerin aksine 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş PLA/PHB kompozit filamentten basılan numunede çekme dayanımı artış göstermiştir.



Şekil 5.73. Referans ve şartlandırılmış filamentten basılan tüm kemik numunelerin çekme dayanımları.

Tüm kemik numunelere ait çekme dayanımları Şekil 5.74'teki grafik ile toplu olarak verilmiştir. Hem 25 °C sıcaklıktaki suda bekletilmiş kemik numuneler hem de 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda bekletilmiş kemik numuneler birbirlerine hem yüzey olarak hem de çekme dayanımları olarak benzer sonuçlar sergilemişlerdir. PLA filamentten yazdırılmış numuneler su ve nemli ortam içerisinde düşük dayanım kaybına uğramışlar ve yüzey kalitelerinde değişim olmamıştır. En fazla dayanım kaybı su içerisinde 15 gün kalan numunede yaşanmıştır.



Şekil 5.74. Referans ve şartlandırılmış tüm kemik numunelerin çekme dayanımları.

Yapılan bu çalışmada çeşitli ortamlara maruz bırakılan PLA filamentin, PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filamentlerin ve bu filamentlerden basılan kemik numunelerin mekanik ve baskı özelliklerinin nasıl değiştiği çekme deneyleri, yüzey pürüzlülük ölçümleri, SEM görüntüleri ve FTIR analizleri yardımı ile araştırılmıştır.

Deneyler için FDM tipi 3B yazıcı, 0.4 mm nozul, buildtak baskı tablası, 1.75mm çaplarında PLA filament, PLA/Grafit ve PLA/PHB kompozit filamentler seçilmiştir. Filamentler ve bu filamentlerden basılan kemik numunelere çekme deneyi uygulanmış, yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, SEM görüntüleri alınmış, FTIR analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Nemli ortama maruz kalmış PLA, PLA/Grafit kompozit filamentlerden yapılan 3B baskılarda baskı kalitelerinin ve çekme dayanımlarının azaldığı görülmüştür.

2. Nemli ortama maruz kalmış PLA/PHB kompozit filamentlerden yapılan 3B baskılarda çekme dayanımının arttığı görülmüştür.

3. PLA filamentten basılmış çekme numunelerinin nemli ortama veya suya maruz kalmaları sonucu yüzey özelliklerinde ve çekme dayanımlarında önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.

4. Nemli ortama veya suya maruz kalmış PLA, PLA/Grafit ve PLA/PHB filamentlerden basılan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır.

5. Nemli ortama maruz kalmış PLA, PLA/Grafit kompozit filamentlerin yazdırılması esnasında filamentlerin birbirine yapışmaması gibi baskı problemleri ile karşılaşılabilmektedir.

6. Nemli ortama maruz kalmış PLA/PHB kompozit filamentlerin yazdırılması esnasında filamentlerin birbirine yapışmaması gibi baskı problemleri yaşanmamaktadır.

7. PLA ve kompozitlerinin referans, şartlandırılmış filamenti ile bu filamentlerden üretilmiş kemik ve ayrıca şartlandırılmış numunelerin FTIR spektrumlarında görülen band değişiklikleri numunelerde oluşan kimyasal değişimi göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçlar akademik araştırmalara ve endüstriyel olarak filament üretimi yapan firmaların ürünlerine katkı sağlayacak niteliktedir. Farklı parametreler ve burada araştırma kapsamı dışında bırakılmış filamentler ve filamentlerden elde edilen ürünler ile yapılacak akademik çalışmalar endüstriyel ürünlerin gelişmesine katkı sağlayacaktır.

.

KAYNAKLAR

Ahart, M. (2019). Types of 3D Printing Technology. 16 Kasım 2021 tarihinde https://www.protolabs.com/resources/blog/types-of-3d-printing adresinden erişildi.

Akın, E. (2007). *Mermer Tozları ve Uçucu Kül ile Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi.* (Yüksek Llisans Tezi). Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Allthat3d. (2021). 15 Kasım 2021 tarihinde https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament adresinden erişildi.

All3dp. (2021). 15 Kasım 2021 tarihinde https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament adresinden erişildi.

All3dp. (2021). 15 Kasım 2021 tarihinde https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology adresinden erişildi.

Arrieta, M. P., Fortunati, E., Dominici, F., Rayón, E., López, J., & Kenny, J. (2014). PLA-PHB/cellulose based films: Mechanical, barrier and disintegration properties. *Polymer Degradation and Stability, 107,* 139-149. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2014.05.010

Arrieta, M. P., Samper, M., Aldas, M., & López, J. (2017). On the Use of PLA-PHB Blends for Sustainable Food Packaging Applications. *Materials, 10*(9), 1008. doi:10.3390/ma10091008

ASTM Standard D638-14, (2014). *Standard test method for tensile properties of plastics.* doi:10.1520/D0638-14

Ausejo, J. G., Rydz, J., Musioł, M., Sikorska, W., Janeczek, H., Sobota, M., Włodarczyk, J., Szeluga, U., Hercog, A., & Kowalczuk, M. (2018). Three-dimensional printing of PLA and PLA/PHA dumbbell-shaped specimens of crisscross and transverse patterns as promising materials in emerging application areas: Prediction study. *Polymer Degradation and Stability, 156,* 100-110. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.08.008

Aydın, H. Y., & Altun, S. (2020). Odun Kökenli Malzemelerin Takviyesi ile Oluşturulan Polilaktik Asit Matrisli Kompozitler. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 22*(3), 1061-1076. doi: 10.24011/barofd.744585

Ayrilmis, N. (2018). Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament. *Polymer Testing, 71,* 163-166.

Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. (2014). Development and characterization of PLA-based green composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials, 27*(1), 52–81. doi:10.1177/0892705712439571

Baran, E. H., & Erbil, H. Y. (2019). Surface Modification of 3D Printed PLA Objects by Fused Deposition Modeling: A Review. *Colloids and Interfaces, 3*(2), 43. doi:10.3390/colloids3020043

Chen, G., Wu, C., Weng, W., Wu, D., & Yan, W. (2003). Preparation of polystyrene/graphite nanosheet composite. *Polymer, 44*, 1781-1784. doi:10.1016/S0032-3861(03)00050-8

Çava, K. (2019). FDM Tipi 3 Boyutlu Yazıcı ile Termoplastik Petek/Öksetik Çekirdek Malzeme Tasarımı, Üretimi ve Sandviç Kompozitlerde Kullanım Özelliklerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Çelik, E. (2019). 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Mekanik Performanslarının Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Çiçek, Ö. Y. (2019). Eriyik Yığma Modelleme ile Üretilen ABS ve PLA Parçaların Mekanik Özelliklerinin Değişken Dolgu Oranlarında Karakterizasyonu ve Sayısal Modellemesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

D'Anna, A., Arrigo, R., & Frache, A. (2019). PLA/PHB Blends: Bio Compatibilizer Effects. *Polymers, 11*(9), 1416. doi:10.3390/polym11091416

Dinigüzel, Ö. (2007). Türkiye'den PHB üreticisi halofilik bakterilerin izolasyonu. (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Domenek, S., & Ducruet, V. (2016). Characteristics and Applications of PLA. S. Kalia & L. Avérous (Ed.), *In Biodegradable and Biobased Polymers for Environmental and Biomedical Applications içinde* (s. 171-224). NJ: Wiley. doi:10.1002/9781119117360.ch6

Drumright, R. E., Gruber, P. R., & Henton, D. E. (2000). Polylactic Acid Technology. *Advanced Materials, 12*(23), 1841-1846. doi:10.1002/1521-4095(200012)12:23<1841::AID-ADMA1841>3.0.CO;2-E

Du, C., & Webb, C. (2011). Cellular Systems. *Engineering Fundamentals of Biotechnology, 2*, 11-23. doi: 10.1016/B978-0-08-088504-9.00080-5

Envisiontec. (2021). 16 Kasım 2021 tarihinde https://envisiontec.com/3d-printing-industries/professional/jewelry adresinden erişildi.

Erbay, K. (2009). *Silah Gövdeleri İçin Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and Mechanical Properties of PLA, and their Functions in Widespread Applications - a Comprehensive Review. *Advanced Drug Delivery Reviews, 107*(2016), 367-392. doi:10.1016/j.addr.2016.06.012

Fiberlogy, (2018). Impact PLA Technical Data Sheet. Polonya. 15 Kasım 2021 tarihinde https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2018/12/TDS-IMPACT-PLA-EN.pdf adresinden erişildi.

Filameon. (2021). 18 Kasım 2021 tarihinde https://www.filameon.com/urun/filameon-175-mm-plagrafit-kendinden-yaglamali-kompozit-filament-50-gr adresinden erişildi.

Fillamentum. (2021). 18 Kasım 2021 tarihinde https://fillamentum.com/collections/nonoilen-filament adresinden erişildi.

Fitzgerald, M. (2013). With 3-D Printing, the Shoe Really Fits. 16 Kasım 2021 tarihinde https://sloanreview.mit.edu/article/with-3-d-printing-the-shoe-really-fits adresinden erişildi.

Formlabs. (2021). 16 Kasım 2021 tarihinde https://formlabs.com/3d-printers adresinden erişildi.

Guo, R., Ren, Z., Bi, H., Xu, M., & Cai, L. (2019). Electrical and Thermal Conductivity of Polylactic Acid (PLA)-Based Bio Composites by Incorporation of Nano-Graphite Fabricated with Fused Deposition Modeling. *Polymers, 11*(3), 549. doi:10.3390/polym11030549

Gutierrez, C. R. R. (2016). Improvıng the engineerıng properties of pla for 3D printing and beyond. (Doktora Tezi). The University of Texas at El Paso/Faculty of the Graduate School, ABD.

Harris, A. M., & Lee, E. C. (2010). Heat and Humidity Performance of Injection Molded PLA for Durable Applications. *Journal of Applied Polymer Science, 115*, 1380-1389. doi: 10.1002/app.30815

Inktonerstore. (2021). 16 Kasım 2021 tarihinde https://blog.inktonerstore.com/3d-printing-know-its-advantages-and-disadvantages adresinden erişildi.

Kakanuru, P., & Pochiraju, K. (2020). Moisture Ingress and Degradation of Additively Manufactured PLA, ABS and PLA/SiC Composite Parts. *Additive Manufacturing, 36*, 101529. doi:10.1016/j.addma.2020.101529

Kamau-Devers, K., Kortum, Z., & Miller, S. A. (2019). Hydrothermal aging of bio-based poly(lactic acid) (PLA) wood polymer composites: Studies on sorption behavior, morphology, and heat conductance. *Construction and Building Materials, 214*, 290-302. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.098

Kaygusuz, B., & Özerinç, S. (2018). 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen PLA Bazlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, 16*(1), 1-6.

Kroll, E., & Artzi, D. (2011). Enhancing aerospace engineering students learning with 3D printing wind-tunnel models. *Rapid Prototyping Journal*, *17*(5), 393 – 402.

Kumar, S., Singh, R., Singh, T. C., & Batish, A. (2020). Fused filament fabrication: A comprehensive review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. doi:10.1177/0892705720970629

Lee, J., An, J., & Chua, C. K. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*, *7*, 120-133. doi:10.1016/J.APMT.2017.02.004

Letcher, T., & Waytashek, M. (2014). Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. doi:10.1115/IMECE2014-39379

Lim, C. W. J., Le, K. Q., Lu, Q., & Wong, C. H. (2016). An Overview of 3-D Printing in Manufacturing, Aerospace, and Automotive Industries. *IEEE Potentials*, *35*(4), 18-22. doi: 10.1109/MPOT.2016.2540098

Link, J. (2019). 3B Baskı İnşaat Sektöründe, Köprülerden Sahnelere Kadar Kendini Hissettirmeye Başladı. 10 Kasım 2021 tarihinde https://redshift.autodesk.com.tr/uzayda-3b-baski/ adresinden erişildi.

Lopes, M. S., Jardini, A. L., & Filho, R. M. (2012). Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications. *Procedia Engineering*, *42*, 1402-1413. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.534

Low, Z., Chua, Y. T., Ray, B. M., Mattia, D., Metcalfe, I. S., & Patterson, D. A. (2017). Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of Membrane Science*, *523*(1), 596-613.

Makerbot. (2021). 16 Kasım 2021 tarihinde https://www.makerbot.com/stories/design/top-5-3d-printing-applications adresinden erişildi.

Martin, (2021). 3D Printer Filament Types | Properties, Uses & Comparison. 15 Kasım 2021 tarihinde https://the3dprinterbee.com/3d-printing-filament-guide-properties-uses adresinden erişildi.

Mashambanhaka, F. (2018). What is 3D Bioprinting?. 16 Kasım 2021 tarihinde https://all3dp.com/2/what-is-3d-bioprinting-simply-explained adresinden erişildi.

Mathur, R. B., Dhakate, S. R., Gupta, D. K., Dhami, T. L., & Aggarwal, R. K. (2008). Effect of different carbon fillers on the properties of graphite composite bipolar plate. *Journal of Materials Processing Technology*, *203*, 184-192. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.10.044

MatterHackers. (2021). 15 Kasım 2021 tarihinde https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare adresinden erişildi.

Miller, D. (2021). Advantages and Disadvantages of 3D Printing. 16 Kasım 2021 tarihinde https://io3dprint.com/advantages-disadvantages-of-3d-printing adresinden erişildi.

Moetazedian, A., Gleadall, A., Han, X., & Silberschmidt, V. (2019). Effect of environment on mechanical properties of 3D printed polylactide for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 102*. doi:10.1016/j.jmbbm.2019.103510

Moiduddin, K., Darwish, S., Al-Ahmari, A., ElWatidy, S., Mohammad, A., & Ameen, W. (2017). Structural and mechanical characterization of custom design cranial implant created using additive manufacturing. *Electronic Journal of Biotechnology, 29*, 22-31.

Murariu, M., Dechief, A. L., Bonnaud, L., Paint, Y., Gallos, A., Fontaine, G., Bourbigot, S., & Dubois, P. (2010). The production and properties of polylactide composites filled with expanded graphite. *Polymer Degradation and Stability, 95*, 889-900.

Nasa. (2014). Space Station 3-D Printer Builds Ratchet Wrench To Complete First Phase Of Operations. 16 Kasım 2021 tarihinde https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/3Dratchet_wrench adresinden erişildi.

Nasa. (2013). 16 Kasım 2021 tarihinde https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/home/feature_3d_food.html adresinden erişildi.

Ooi, T. (2019). 5 Greatest 3D Printing Applications. 27 Haziran 2021 tarihinde https://all3dp.com/2/greatest-3d-printing-applications adresinden erişildi.

Patan, Z. Y. (2019). Karbon Fiber Takviyeli ABS Kompozitlerin FDM 3B Yazıcı ile Üretimi ve Ansys ile Modellenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.

Patel, V. N., & Kadia, K. P. (2014). Parametric Optimization of The Process of Fused Deposition Modelling In Rapid Prototyping Technology – A Review. *IJIRST - International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, *1*(7), 80–82.

Porfyris, A., Vasilakos, S., Zotiadis, C., Papaspyrides, C., Moser, K., Schueren, L., Buyle, G., Pavlidou, S., & Vouyiouka, S. (2018). Accelerated ageing and hydrolytic stabilization of poly(lactic acid) (PLA) under humidity and temperature conditioning. *Polymer Testing, 68*, 315-332. doi:10.1016/j.polymertesting.2018.04.018

Prabhakar, M., Saravanan, A. K., Lenin, A., Leno, I., Mayandi, K., & Piramanayagam, S. R. (2020). A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. *Materials Today: Pr°C eedings, 45*(2), 6108-6114. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.225

Przekop, R. E., Kujawa, M., Pawlak, W., Dobrosielska, M., Sztorch, B., & Wieleba, W. (2020). Graphite Modified Polylactide (PLA) for 3D Printed (FDM/FFF) Sliding Elements. *Polymers, 12*(6), 1250. doi:10.3390/polym12061250

Quanjin, M., Rejab, M. R. M., Idris, M. S., Kumar, N. M., Abdullah, M. H., & Reddy, G. R. (2020). Recent 3D and 4D intelligent printing technologies: A comparative review and future perspective. *Procedia Computer Science*, *167*, 1210–1219.

Ramya, A., & Vanapalli, S. I. (2016). 3D Printing Technologies in Various Applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET*), *7*(3), 396-409.

Rathore, P. (2014). Bioprospects of PHB: A Review. *International journal of Emerging Trends in Science and Technology*, *1*(4), 529-532.

Sajna, V., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2017). Moisture absorption behavior of hybrid bionan°C omposites of polylactic acid and evaluation of physicochemical properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *30*(4), 521–544. doi:10.1177/0892705715604679

Sajna, V., Nayak, S. K., & Mohanty, S. (2016). Weathering and Biodegradation Study on Graft Copolymer Compatibilized Hybrid Bionanocomposites of Poly(Lactic Acid). *Journal of Materials Engineering and Performance*, *25*(7), 2895–2906. doi:10.1007/s11665-016-2151-z

Savini, A., & Savini, G. G. (2015). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON*), *1*-8. doi:10.1109/HISTELCON.2015.7307314

Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *In Procedia Manufacturing*, *35*, 1286–1296. doi:10.1016/j.promfg.2019.06.089

Shinzawa, H., Nishida, M., Tanaka, T., & Kanematsu, W. (2012). Accelerated Weathering-Induced Degradation of Poly(Lactic Acid) Fiber Studied by Near-Infrared (NIR) Hyperspectral Imaging. *Applied spectroscopy*, 66(4), 470-474. doi:10.1366/11-06540.

Sınıksaran, M. (2012). *Volkanik Tüf Tozları ile Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Simplify3d. (2021). 15 Kasım 2021 tarihinde https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pva adresinden erişildi.

Siracusa, V., Karpova, S., Olkhov, A., Zhulkina, A., Kosenko, R., & Iordanskii, A. (2020). Gas Transport Phenomena and Polymer Dynamics in PHB/PLA Blend Films as Potential Packaging Materials. *Polymers*, *12*(3), 647. doi:10.3390/polym12030647

Snikhovska, K. (2020). The Different Types of 3D Printing Technology. 20 Kasım 2021 tarihinde https://penandplastic.com/3d-printer-types/ adresinden erişildi.

Spinelli, G., Lamberti, P., Tucci, V., Kotsilkova, R., Tabakova, S., Ivanova, R., Angelova, P., Angelov, V., Ivanov, E., Di Maio, R., Silvestre, C., Meisak, D., Paddubskaya, A., & Kuzhir, P. (2018). Morphological, Rheological and Electromagnetic Properties of Nanocarbon/Poly(lactic) Acid for 3D Printing: Solution Blending vs. Melt Mixing. *Materials*, *11*(11), 2256. doi:10.3390/ma11112256

Syed, A. M. T., Elias, P. K., Amit, B., Susmita, B., Lisa, O., & Charitidis, C. (2017). Additive manufacturing: scientific and technological challenges,market uptake and opportunities. *Materials Today*, *21*(1), 22-37. doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001

Tantothai, W., & Suppakul, P. (2013). Moisture Sorption and Isosteric Heat of Sorption Characteristics of Polylactic Acid. 13th ASEAN Food Conference, Singapore.

Twi-global. (2021). 16 Kasım 2021 tarihinde https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons adresinden erişildi.

Uzun, M., & Erdoğdu, Y. E. (2020). Eriyik Yığma Modellemesi ile Üretimde Takviyesiz ve Takviyeli PLA Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *10*(4), 2800-2808. doi: 10.21597/jist.799230

Yashavanth, P. R., Das, M., & Maiti, S. K. (2021). Recent progress and challenges in cyanobacterial autotrophic production of polyhydroxybutyrate (PHB), a bioplastic. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*, 105379. doi:10.1016/j.jece.2021.105379

Yuanyuan, X., Xiaoyue, W., Xiao, G., Bin, K., Min, Z., Xiang, Q., Shengli, M., & Wei, S. (2017). The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors*, *17*(6), 1166. doi:10.3390/s17051166

Zhang, M., & Thomas, N. L. (2011). Blending polylactic acid with polyhydroxybutyrate: The effect on thermal, mechanical, and biodegradation properties. Advances in Polymer Technology, 30(2), 67-79. doi:10.1002/adv.20235

3dinsider. (2021). 15 Kasım 2021 tarihinde https://3dinsider.com/3d-printing-materials adresinden erişildi.

3dinsider. (2020). 16 Kasım 2021 tarihinde https://3dinsider.com/3d-printer-types adresinden erişildi.

3dprinteruniverse. (2021). 23 Haziran 2021 tarihinde https://3dprinteruniverse.com/blogs/world-of-3d-printing/anatomy-of-a-3d-printer adresinden erişildi.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim:	Süleymanpaşa İlköğretim Okulu
Lise:	Tekirdağ Fen Lisesi
Lisans:	Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans:	Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurumlar

08.2012 – 09.2012	OLİN Edirne Yağ Sanayi ve Ticaret A.Ş. Stajyer
08.2014 – 09.2014	S.S Tariş İncir Tarım Satış Kooperatifleri Birliği Stajyer
06.2016 –11.2018	Sanofi İlaç San. Ve Tic. A.Ş. Ruhsatlandırma Uzman Yardımcısı

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

Tez ile ilgili projeler

Poli(Laktik Asit)'in (PLA) Özelliklerinin İyileştirilerek 3 Boyutlu Yazıcılarda Filament Olarak Kullanımı ve Alternatif Uygulama Alanlarının İncelenmesi, TÜBAP, 2019/284, Proje Yürütücüsü: Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÖZYILDIRIM, Yardımcı Araştırmacı: Mühendis Gökçen ÇEVİK (2019).

Tez konusu ile ilgili yayınlar

Çevik, G (2019). Poli(Laktik Asit)'in (PLA) Özelliklerinin İyileştirilerek 3 Boyutlu Yazıcılarda Filament Olarak Kullanımı. Poster Sunum. Trakya Üniversiteler Birliği IV. Lisanüstü Öğrenci Kongresi, Kırklareli.